

Bruno Santos Vieira

**UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO
DE OPERAÇÕES DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE
ÁGUA DA CIDADE DE FLORIANÓPOLIS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia de
Produção e Sistemas da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Produção.
Orientadora: Lucila Maria de Souza
Campos, Dr.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Vieira, Bruno

UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO
DE OPERAÇÕES DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE
ÁGUA DA CIDADE DE FLORIANÓPOLIS / Bruno Vieira ;
orientadora, Lucila M. S. Campos - Florianópolis, SC, 2016.

114 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção.

Inclui referências

1. Engenharia de Produção. 2. Sistema de Abastecimento de Água.
3. Otimização. 4. Operação. 5. Energia elétrica. I. M. S. Campos,
Lucila. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

Bruno Santos Vieira

**UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO
DE OPERAÇÕES DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE
ÁGUA DA CIDADE DE FLORIANÓPOLIS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação de Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 28 de novembro de 2016.

Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr.
Coordenador de Pós Graduação

Banca examinadora:

Prof. Lucila Maria de Souza Campos Dra.
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antônio Sérgio Coelho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Carlos Ernani Fries, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Aos meus pais, Eduardo e Mariléia; aos meus irmãos, Diego e Bianca; à minha namorada Samira; e aos meus amigos; merecedores de todo meu amor, admiração e respeito. Dedico a eles todo o meu carinho e esforço.

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais, Eduardo e Mariléia, meus exemplos de vida, aos quais tenho eterna gratidão por não medirem esforços para oferecer-me a melhor educação, ainda que isso lhes custasse a renúncia dos próprios anseios.

Aos meus irmãos, Bianca e Diego, por serem sempre tão amorosos e preocupados com meu bem-estar ao longo de todos esses anos de dedicação aos estudos.

À minha namorada e melhor amiga Samira, por me cultivar todo seu amor, carinho e compreensão, dedicando-me incansáveis palavras de incentivo e inspiração durante todo o percurso.

À minha orientadora, Lucila Campos, pela sabedoria e apurada assertividade dedicadas na orientação desta pesquisa.

Ao professor Sérgio Fernando Mayerle, pelo incansável desejo de transmitir seu conhecimento aos alunos, atributo que contribuiu sobremaneira para este trabalho.

Ao professor Leandro Callegari Coelho, pelo interesse, dedicação e suporte técnico dispendidos no tema desta pesquisa.

Ao professor Carlos Ernani, pela presteza em fazer apontamentos e sugestões sempre tão pertinentes.

Ao funcionário da prestadora de serviço de água, Diego, sempre solícito e comprometido no suporte a este trabalho.

Ao corpo docente da Universidade Federal de Santa Catarina, por conduzir as aulas com maestria e contribuir memoravelmente para a minha formação.

Aos demais familiares, amigos e todos que acreditaram na realização deste trabalho.

RESUMO

A operação de Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) costuma ser bastante complexa, sobretudo em virtude do comportamento não linear entre fluxos e pressões da rede, o que dificulta a tomada de decisão e o entendimento sobre a resposta do sistema diante de mudanças de estratégias na operação. Além disso, os SAA costumam estar sujeitos a tarifas energéticas variáveis ao longo do dia, sendo que o custo com energia nesses sistemas pode chegar a 30% dos custos operacionais totais e sua gestão costuma representar, portanto, aumento de eficiência. Diante de tais complexidades, a otimização da operação de SAA surge como um método para reduzir os custos operacionais e, ao mesmo tempo, assegurar o nível de serviço à população. No entanto, não são frequentes os trabalhos que abordam a otimização de SAA em contextos práticos, fator este que questiona a aplicabilidade e sugere limitações dos modelos existentes na literatura. Nesse sentido, foi proposto um modelo de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), seguido de uma relaxação linear para o mesmo, transformando-o em um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Tal relaxação incorre em perda de precisão, mas permite a utilização das técnicas e solucionadores bem consolidados para a resolução de formulações de PLIM. A relaxação proposta incorre em erros, e embora seja possível controlá-los, sua utilização pode resultar em soluções inviáveis. Por isso foi proposto um procedimento que busca viabilizar as soluções do modelo relaxado. Para testar a aplicabilidade do método proposto optou-se por utilizar como objeto de pesquisa uma parte do SAA da cidade de Florianópolis, situada no sul do Brasil, o qual abastece aproximadamente 80.000 habitantes, com cerca de 600.000m³ de água por mês. Utilizando o método proposto, obteve-se um plano de operações com um custo 16,82% menor que o da solução adotada pela prestadora do serviço, além de uma redução da energia cedida ao sistema, em mesma proporção dos ganhos financeiros, e uma redução de 27,45% das perdas de carga, o que destaca o benefício ambiental em potencial que a otimização da operação de SAA pode trazer. A principal contribuição desta pesquisa consiste no método de resolução proposto e no estudo de caso realizado, o qual amplia o número de trabalhos com casos reais na literatura e corrobora a aplicabilidade de ferramentas de otimização para obter benefícios econômicos e ambientais para os SAA.

Palavras-chave: Sistema de Abastecimento de Água. Otimização. Operação. Energia elétrica.

ABSTRACT

The Water Supply Systems operation (WSS) is usually quite complex, mainly due to non-linear behavior between network flows and pressures, what makes difficult the decision making and understanding of the system response in the face of strategies changes on the operation. In addition, the WSS are usually subject to variables energy charges throughout the day, and the energy cost in such systems can reach 30% of total operating costs and its management often represents therefore increased efficiency. Faced with these complexities, the optimization of the SAA operation appears as a method to reduce operating costs and at the same time ensuring the level of service to the population. However, there are not many researches on the SAA optimization in practical contexts, a factor that questions the applicability and suggests limitations of existing models in the literature. Aiming to solve the problem, we propose Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) model, followed by a linear relaxation to it, turning it into a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model. This relaxation incurs loss of precision, but allows the use of well-established techniques and solvers for resolving MILP formulations. Relaxation proposal incurs errors, and although you can control them, their use can result in infeasible solutions. So we propose a procedure in order to make possible the solutions of the relaxed model. To test the applicability of the proposed method was chosen for use as a research subject a part of the WSS of the city of Florianopolis, located in southern Brazil, which supplies about 80,000 inhabitants with about 600.000m³ of water per month. Using the proposed method, we obtained a operation plan of with a cost 16.82% lower than the solution adopted by the service provider, as well as a reduction in the energy imparted to the system in same proportion of financial gains and a reduction 27.45% of the head losses, which highlights the potential environmental benefit that optimizing SAA operation can bring. The main contribution of this research is the proposed resolution method and conducted case study, which expands the number of work on real cases in the literature and confirms the applicability of optimization tools for economic and environmental benefits for the WSS.

Keywords: Water Supply System. Optimization. Operation. Electricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disponibilidade de água per capita entre países	25
Figura 2 – Exemplo de sistema de abastecimento de água.....	26
Figura 3 – Estruturação dos capítulos	34
Figura 4 – Perda de carga em função do fluxo.....	39
Figura 5 - Mapa conceitual das combinações de abordagens dos artigos do portfólio.....	43
Figura 6 – Exemplo de função linear de <i>piecewise</i>	49
Figura 7 – Método de combinação convexa.....	50
Figura 8 – Método incremental	51
Figura 9 – Método de Polisetty e Gatzke	53
Figura 10 – Exemplo de aproximação de <i>piecewise</i> da função objetivo	64
Figura 11 – Exemplo de relaxação de <i>piecewise</i> para uma curva característica de bomba	64
Figura 12 – Exemplo de relaxação de <i>piecewise</i> para a equação de HW	64
Figura 13 – Exemplo de rede contendo arcos com fluxo notável	69
Figura 14 – Exemplo de rede com bomba e válvula em paralelo.....	71
Figura 15 – Exemplo de rede com bombas idênticas em paralelo	72
Figura 16 – Exemplo de erro máximo de uma curva característica de bomba.....	72
Figura 17 – Exemplo de erro máximo de uma curva de H-W.....	73
Figura 18 – Exemplo de erro máximo de uma curva de HW com duas partes	74
Figura 19 - Heurística da metodologia proposta	76

Figura 20 – Relatório de energia da simulação da operação da prestadora do serviço de junho de 2014	82
Figura 21 – Modelo hidráulico de parte do SAA de Florianópolis	83
Figura 22 – SAA de Florianópolis antes e após a definição dos arcos notáveis	84
Figura 23 – Exemplo de três tubulações com perda de carga desprezível	85
Figura 24 – Bombas idênticas em paralelo do SAA de Florianópolis ..	86
Figura 25 – Relaxações utilizadas para as equações de H-W do SAA de Florianópolis	87
Figura 26 – Comparativo da evolução das soluções	92
Figura 27 - Combinação de palavras utilizadas na busca.....	106
Figura 28 - Relevância dos Periódicos no Portfólio Bibliográfico	108
Figura 29 - Relevância dos Artigos do Portfólio Bibliográfico	109
Figura 30 - Autores com maior participação no portfólio bibliográfico	110
Figura 31 - Palavras chave mais utilizadas no Portfólio Bibliográfico	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – (Sub) Grupos, tensões de fornecimento e opções de tarifação	38
Tabela 2 – Folha de verificação para levantamento da demanda por bairro	78
Tabela 3 – Folha de verificação para coleta de informação de nós	79
Tabela 4 – Fatores de multiplicação de variação da demanda ao longo de um dia	79
Tabela 5 – Folha de verificação para levantamento de dados sobre os reservatórios	80
Tabela 6 – Folha de verificação para coleta de informação de arcos	81
Tabela 7 – Folha de verificação para levantamento de dados de bomba	81
Tabela 8 – Comparativo de custos reais e simulados da operação da prestadora	82
Tabela 9 – Solução do modelo obtida pelo <i>NEOS Server</i>	88
Tabela 10 – Emulação da solução	88
Tabela 11 – Solução adaptada	89
Tabela 12 – Panorama das soluções obtidas	90
Tabela 13 – Comparativo entre solução otimizada e da prestadora	90
Tabela 14 – Comparativo energético entre solução otimizada e a da prestadora	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre etapas e objetivos específicos	32
Quadro 2 – Abordagem preponderante dos artigos do portfólio	42
Quadro 3 – Parâmetros do modelo proposto por Ghaddar <i>et al.</i> (2015)	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACF – Algoritmo de Colônia formigas
AE – Algoritmos Evolutivos
AG – Algoritmo genético
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BT – Busca Tabu
CELESC – Central Elétrica de Santa Catarina
EPANET – Simulador hidráulico
ETA – Estação de Tratamento de Água
GAMS – *General Algebraic Modeling System*
HS – *Harmony Search*
HW – Hazen-Williams
M.C.A. – Metros de coluna d'água
NBR – Norma Brasileira
OEP – Otimização por Enxame de Partículas
PD – Programação Dinâmica
PL – Programação Linear
PLIM – Programação Linear Inteira Mista
PNL – Programação Não Linear
PNLIM – Programação Não Linear Inteira Mista
POWADIMA – *Potable Water Distribution Management*
SA – *Simulated Annealing*
SAA – Sistema de Abastecimento de Água
SCE – *Shuffled Complex Evolution*

SUMÁRIO

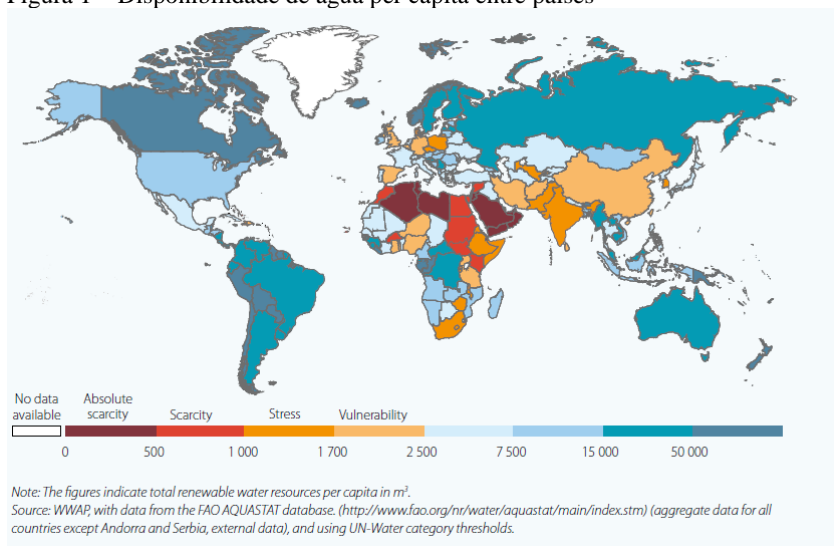
1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS	27
1.1.1 Geral	27
1.1.2 Específicos	27
1.2 JUSTIFICATIVA	28
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	30
1.4 CARACTERIZAÇÃO E ETAPAS DA PESQUISA	31
1.5 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO:	
ESTRUTURAÇÃO DOS CAPÍTULOS	32
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1 ASPECTOS GERAIS DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (SAA)	35
2.1.1 Componentes de um SAA	35
2.1.2 Tarificação energética brasileira	36
2.1.3 Modelagem hidráulica de SAA.....	38
2.2 OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	41
2.3 MÉTODOS DE SOLUÇÃO DE PNLIM	49
2.3.1 Aproximações de <i>piecewise</i> para modelos de PNLIM	49
2.3.2 Relaxações de <i>piecewise</i> para modelos de PNLIM	52
2.3.3 Comparativo entre relaxações e aproximações de <i>piecewise</i>	53
2.3.4 Linearização do produto de variáveis binárias e contínuas	54
2.3.5 Técnicas para redução da complexidade de modelos PLIM	55
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	56
3 MODELOS MATEMÁTICOS E TÉCNICA DE SOLUÇÃO PROPOSTA	57
3.1 FORMULAÇÃO POR PNLIM	57
3.2 RELAXAÇÃO LINEAR DA FORMULAÇÃO PNLIM	

3.3	SIMPLIFICAÇÕES	68
3.3.1	Arcos com fluxo notável	68
3.3.2	Arcos com perda de carga desprezível.....	69
3.3.3	Inequações válidas	70
3.3.4	Simetrias	71
3.4	DEFINIÇÃO DE <i>BREAKPOINTS</i>	72
3.5	ESTRATÉGIA PARA APLICAÇÃO DO MODELO...74	
4	TESTE NUMÉRICO DO MODELO PROPOSTO	77
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	77
4.2	COLETA DE DADOS	77
4.2.1	Dados de nós	78
4.2.2	Dados de reservatórios	80
4.2.3	Dados de arcos.....	80
4.2.4	Dados de bombas.....	81
4.3	ANÁLISE DE DADOS	81
4.4	FORMULAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS	83
4.4.1	Arcos com fluxo notável	84
4.4.2	Arcos com perda de carga desprezível.....	85
4.4.3	Cortes e quebra de simetrias.....	85
4.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	87
4.6	VALIDAÇÃO	93
5	CONCLUSÕES	95
	REFERÊNCIAS.....	97
	APÊNDICE A – BIBLIOMETRIA	105
	APÊNDICE B – PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO	113

1 INTRODUÇÃO

Até 2030, projeta-se que a demanda de água supere a capacidade de suprimento em 40% em todo o mundo, caso se mantenham as atuais práticas de gestão do recurso (2030 WRG, 2009). Atualmente, a distribuição e disponibilidade dos recursos de água doce, por meio da precipitação e escoamento superficial, já se apresentam de forma irregular nas diferentes áreas do globo e em diferentes épocas do ano (WWAP, 2015). A Figura 1 evidencia as diferenças de disponibilidade de água per capita entre diferentes países.

Figura 1 – Disponibilidade de água per capita entre países



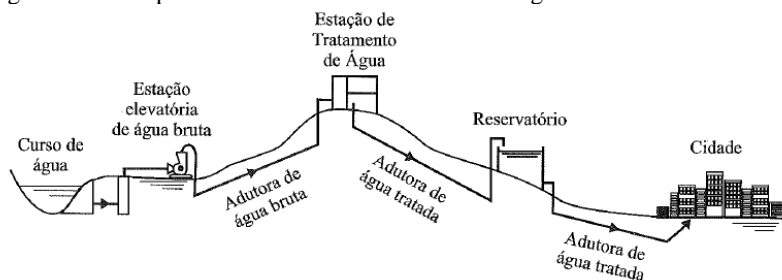
Fonte: (WWAP, 2015).

Além dos limites impostos pela disponibilidade de recursos hídricos, outros aspectos influenciam na percepção de qualidade dos usuários de serviços relacionados ao suprimento de água. Fatores relacionados à gestão e eficiência são cruciais para um melhor desempenho operacional em Sistema de Abastecimento de Água (SAA) (WORLD BANK, 2012). Um sistema de abastecimento de água deve garantir o fornecimento de água em quantidade suficiente e de qualidade adequada aos padrões de potabilidade para a população (RAMOS *et al.*, 2010).

Devido ao ritmo acelerado de urbanização, governantes e prestadores de serviços públicos de água têm tido dificuldades para aumentar os investimentos e gerir a prestação dos serviços, especialmente em cidades com infraestrutura precária e em cidades de países em desenvolvimento (WWAP, 2015).

Segundo Tsutiya (2006), um SAA típico é composto por mananciais, estações elevatórias, adutoras, estações de tratamento de água (ETAs), reservatórios e redes de distribuição. O autor explica que a água é captada dos mananciais, recalçada pelas estações elevatórias (bombas) e conduzida através das adutoras até as ETAs, de modo a torná-la potável. Após o tratamento, a água é novamente recalçada por bombas e conduzida por adutoras até os reservatórios, a partir dos quais as cidades são abastecidas por meio de redes de distribuição. A Figura 2 resume o percurso usual da água nos SAA.

Figura 2 – Exemplo de sistema de abastecimento de água



Fonte: Tsutiya (2006)

Encontrar estratégias que atendam os requisitos dos SAA e com os menores custos costuma dispendir grande dificuldade. O comportamento hidráulico de sistemas de distribuição de água é não-linear e o número de possíveis estratégias de operação se torna muito grande, mesmo para sistemas de pequeno porte (GIACOMELLO *et al.*, 2013).

Um dos itens de custo mais relevantes em SAA é o custo com energia elétrica. Em geral, os valores representam de 5% a 30% dos custos operacionais totais dos SAA (WORLD BANK, 2012). Assim, eficiência em SAA está relacionada com gestão energética e pode viabilizar novos investimentos e expansões dos sistemas, possibilitando um aumento do nível de serviço prestado.

Ressalta-se ainda que as tarifas energéticas as quais os SAA estão sujeitos costumam ser variáveis ao longo do dia, o que pode dificultar

ainda mais a tomada de decisão. Por outro lado, em função dessas políticas praticadas pelas distribuidoras de energia, no sentido de tarifar diferentemente o consumo ocorrido em diferentes períodos do dia, surgem oportunidades para a racionalização energética na operação (TOLEDO *et al.*, 2008)

Nos últimos anos, a escassez de água tem mobilizado pesquisadores a abordar as questões atinentes aos sistemas de abastecimento de água, especialmente no que se refere à expansão da rede (EUSUFF; LANSEY, 2003; SHERALI *et al.*, 2001), ao dimensionamento de tubulações (BRAGALLI *et al.*, 2012; GEEM, 2006), e à operacionalização dos sistemas, a qual será tema desta pesquisa.

O problema de operação dos SAA consiste em determinar os horários em que cada estação elevatória deve permanecer em funcionamento, de modo a garantir o suprimento de água, com pressões adequadas ao longo do sistema e com o menor custo possível.

Embora a quantidade de abordagens para a operacionalização de SAA tenha crescido nos últimos anos na literatura, ainda são raros os trabalhos demonstrando aplicações dessas abordagens em contextos práticos, sobretudo em aplicações de grande porte (BŁASZCZYK *et al.*, 2010). Nesse sentido, surge a necessidade de validação acerca da aplicabilidade dos modelos de gestão existentes na literatura em contextos práticos, problema para o qual esta pesquisa pretende contribuir.

1.1 OBJETIVOS

A seguir, são apresentados os objetivos geral e específicos da presente pesquisa.

1.1.1 Geral

O objetivo geral consiste em propor um modelo de otimização capaz de gerar um plano de operações para parte do sistema de distribuição de água presente em Florianópolis, Santa Catarina, de modo a minimizar os custos de energia elétrica.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a) elaborar um modelo de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) para o problema da operação de SAA.
- b) criar uma relaxação linear para o mesmo, transformando-o em um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).
- c) minimizar a função objetivo do modelo a ser elaborado, por meio de pacotes de otimização
- d) propor um procedimento para viabilizar as soluções do modelo relaxado.
- e) validar a solução obtida através do modelo, por meio da análise dos dados e entrevistas realizadas com a gerência da empresa.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Błazszyk *et. al.* (2010), não são frequentes os trabalhos envolvendo otimização de problemas práticos em SAA, sobretudo nos maiores, o que sugere a necessidade de verificação da aplicabilidade dos modelos de otimização da literatura em redes reais, evidenciando, portanto, a importância da presente pesquisa.

Uma gestão adequada dos SAA permite que se desenvolva uma política integrada, considerando questões relativas à água, à eficiência energética e questões ambientais (RAMOS *et al.* 2010).

A integração entre os fatores ambientais, econômicos e sociais, constitui o tripé *Triple Bottom Line*, criado por Elkington (1994), para quem a definição de sustentabilidade consiste no equilíbrio dessas três dimensões.

É imprescindível que se considere o papel da água ao abordar qualquer dos grandes objetivos da sustentabilidade, uma vez que o progresso em cada uma das suas esferas – ambiental, econômica e social – está vinculado aos limites impostos pela disponibilidade de água e a forma como o recurso é gerido pelas prestadoras dos serviços de abastecimento (WWAP, 2015).

Corroborando a reflexão proposta pelos autores, esta pesquisa traz contribuições para os três pilares da atuação sustentável.

Na esfera ambiental, sabe-se que a otimização da operação de redes de água pode evitar o uso desnecessário de recursos e minimizar o impacto ecológico causado pela poluição e as emissões de gases de efeito estufa (GHADDAR *et al.*, 2015).

Sob o prisma econômico, segundo Ramos *et al.* (2010), a eficiência energética desempenha um papel fundamental para reduzir a emissão de CO₂ e, ao mesmo tempo, obter um bom resultado em termos de redução de custos. Ainda de acordo com os autores, a fim de atender as obrigações internacionais, o uso eficiente da energia convencional e uso adequado de fontes de energia renováveis têm recebido mais atenção da União Europeia (UE) ao longo da última década, por meio de políticas que focam sobre as metas de redução da emissão de CO₂, as quais são objetivo do Acordo de Kyoto.

O custo operacional de bombeamento em uma rede de distribuição de água representa uma fração significativa do total das despesas incorridas em sua gestão operacional, em todo o mundo (LÓPEZ-IBÁÑEZ *et al.*, 2008). Giacomello *et al.* (2013) afirmam que diante da complexidade do problema, o uso de otimização para a programação de bombas em SAA tem provado ser um método altamente eficaz para, ao mesmo tempo, garantir um serviço confiável e reduzir os custos operacionais, sem que seja necessário efetuar alterações na infraestrutura real do sistema. Assim, a validação da aplicabilidade de modelos de otimização em SAA poderá incentivar seu uso e, com isso, contribuir para o aspecto econômico das prestadoras de serviços de abastecimento de água.

Além dos dois pilares já citados – ambiental e econômico –, este trabalho implica também em um aspecto social. Sendo a água um recurso fundamental para os seres vivos, a redução de custos em SAA pode possibilitar que as empresas de distribuição de água sejam mais competitivas e que novos investimentos em expansão e melhoria no nível de serviço passem a ser viáveis, contribuindo para que o recurso de água torne-se mais acessível para toda sociedade (WORLD BANK, 2012).

Ademais, o consumo mundial de energia para distribuição de água representa entre 2% e 3% da energia global consumida (ASE, 2002), sendo que no Brasil, o indicador fica próximo dos valores mundiais, atingindo a marca dos 3%, o que equivale a 9 bilhões de kWh/ano (ELETROBRÁS, 2005). Deste modo, a redução do consumo energético em SAA tem um grande potencial de redução do consumo energético em todo mundo.

Feitas estas considerações, cabe destacar que, dentre as áreas da Engenharia de Produção, esta pesquisa se enquadra nas áreas de: a) Pesquisa Operacional, a qual, segundo a ABEPRO (2016), consiste na resolução de problemas reais envolvendo situações de tomada de decisão, através de modelos matemáticos usualmente processados

computacionalmente, aplicando conceitos e métodos multidisciplinares na concepção, no planejamento ou na operação de sistemas para atingir seus objetivos; e b) Engenharia da Sustentabilidade, a qual consiste no planejamento da utilização eficiente dos recursos naturais nos sistemas produtivos diversos (ABEPRO, 2016).

A aplicação da ferramenta de Pesquisa Operacional em SAA reforça sua interdisciplinaridade e aplicabilidade em diferentes situações, incentivando seu uso em contextos ambientais semelhantes e permitindo que novas extrapolações sejam vislumbradas quanto à sua aplicação.

O problema a ser tratado se assemelha a uma série de outros problemas relacionados à Engenharia de Produção. Ao se considerar a água como um produto qualquer a ser manufaturado, por analogia poder-se-ia considerar as tubulações como caminhos (estradas ou distâncias dentro de uma mesma fábrica, por exemplo); os reservatórios como estoques (sejam eles intermediários ou até mesmo centros de distribuição); as perdas por atrito das tubulações poderiam ser as perdas por qualidade entre processos em função da taxa de produção; os pontos de consumo como clientes do processo anterior; os custos de energia elétrica e tratamento como custos de transporte e de processamento. Esta analogia representa a estreita relação entre os SAA e um sistema de produção convencional. Embora os SAA tenham características específicas desses tipos de sistema, as semelhanças se sobressaem e permitem que sejam considerados como um sistema de produção convencional com algumas particularidades.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa visa propor um plano de operações para o SAA presente em Florianópolis, Santa Catarina, de modo a minimizar os custos de energia elétrica e de tratamento, por meio de modelagem matemática das características físicas e das restrições de planejamento existentes.

Serão consideradas, como parte da rede de distribuição, somente as tubulações maiores ou iguais a 50mm, haja vista que dessa forma o sistema fica bem representado pela modelagem e não se incluem tubulações desnecessárias que aumentariam a complexidade do problema sem agregar precisão considerável ao modelo.

O trabalho inclui, ainda, um comparativo entre a solução a ser proposta e a solução adotada pela empresa, além da validação da solução otimizada por meio do software de simulação hidráulica

EPANET e da opinião de especialistas quanto à validade da solução encontrada.

Não faz parte do escopo desta pesquisa desenvolver métodos de solução para o problema em questão, sobretudo porque se espera que os pacotes comerciais de otimização sejam capazes de solucionar o problema. Também não é escopo deste projeto a aplicação da solução proposta na empresa prestadora do serviço, uma vez que a aplicação é decisão que compete à empresa.

1.4 CARACTERIZAÇÃO E ETAPAS DA PESQUISA

Considerando-se as metodologias existentes, pode-se definir que este trabalho foi orientado pela metodologia de pesquisa baseada em modelos quantitativos, de natureza empírica e normativa (BERTRAND E FRANSOO, 2002), uma vez que o objetivo que se pretende atingir é o de prescrever uma solução para um problema real de um SAA, a partir de modelos matemáticos, utilizando técnicas de Pesquisa Operacional.

Segundo Hillier e Lieberman (2006), em um estudo de Pesquisa Operacional se fazem presentes as seguintes fases clássicas: a) definição do problema; b) coleta de dados; c) análise de dados; d) formulação dos modelos matemáticos; e) desenvolvimento de procedimento computacional para resolução do problema; f) testes e aprimoramento dos modelos; g) análise dos resultados obtidos; h) validação. A aplicação do modelo a ser proposto seguirá estas fases e seu detalhamento será apresentado no capítulo 4.

A cada fase descrita, pode-se estabelecer uma estreita relação com os objetivos específicos do trabalho e, ainda, apontar para os resultados esperados da mesma. Esta relação é evidenciada no Quadro 1.

Quadro 1 – Relação entre etapas e objetivos específicos

Etapa	Objetivos específicos	Resultados esperados
a) Definição do problema, coleta e análise de dados b) Formulação dos modelos matemáticos	Elaborar um modelo de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) para o problema da operação de SAA; Criar uma relaxação linear para o mesmo, transformando-o em um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).	Espera-se obter um modelo GAMS referente ao SAA Florianópolis
c) Desenvolvimento de procedimento computacional para resolução do problema d) Testes e aprimoramento dos modelos	Minimizar a função objetivo do modelo a ser elaborado, por meio de pacotes de otimização; Propor um procedimento para viabilizar as soluções do modelo relaxado.	Espera-se obter um plano de operações para o SAA objeto de estudo
e) Análise dos resultados obtidos e validação	Validar a solução obtida através do modelo, por meio da análise dos dados e entrevistas realizadas com a gerência da empresa	Espera-se assegurar que o modelo esteja consistente com a realidade e que a solução proposta seja factível

Fonte: Elaboração do autor, 2016.

No item a seguir, será apresentada a estrutura do trabalho e o resumo de cada capítulo.

1.5 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO: ESTRUTURAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O desenvolvimento desta pesquisa foi estruturado em seis capítulos. O presente capítulo introduziu aspectos gerais da pesquisa,

definindo os objetivos geral e específicos, justificando e elucidando a importância da pesquisa, para, ao final, delimitá-la.

O segundo capítulo cuidará de apresentar a revisão bibliográfica de alguns conceitos essenciais para o desenvolvimento do trabalho, tais como, a definição dos elementos fundamentais de SAA, a programação operacional de SAA, os custos de SAA, além dos modelos matemáticos e técnicas utilizadas na resolução do problema. Nesse capítulo, o modelo a ser adaptado para o caso em estudo será explicitado.

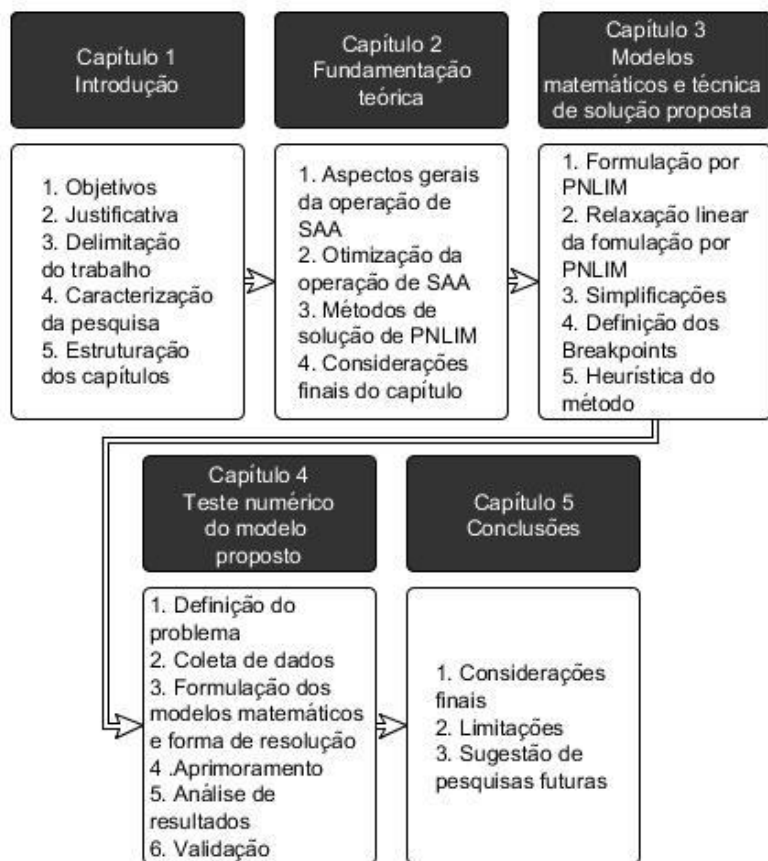
No capítulo três, serão demonstrados os modelos matemáticos, o procedimento a ser utilizado em conjunto com os modelos, bem como uma série de simplificações possíveis para o problema.

O capítulo quatro, por sua vez, consistirá na aplicação dos modelos propostos no capítulo três no sistema da cidade de Florianópolis, seguindo os procedimentos metodológicos típicos de um estudo de pesquisa operacional. O mesmo capítulo incluirá a análise e validação dos resultados, além de um comparativo entre as soluções da empresa e a proposta pelo método.

O quinto e último capítulo buscará resgatar os objetivos propostos inicialmente e tecer as considerações finais com base nos resultados obtidos, sugerindo-se o direcionamento de pesquisas que, futuramente, poderão vir a ser conduzidas de modo a dar continuidade à discussão iniciada neste trabalho e suprir suas limitações.

Um panorama geral da estruturação dos capítulos é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Estruturação dos capítulos



Fonte: Elaboração do autor (2016)

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Tendo em vista a essência do assunto a ser tratado nesta pesquisa, torna-se indispensável, num primeiro momento, tecer contornos gerais acerca: a) da operação de SAA; e b) da otimização da operação de SAA.

2.1 ASPECTOS GERAIS DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (SAA)

A operação de sistemas de distribuição de água envolve uma grande quantidade de variáveis. Se por um lado a confiabilidade do sistema deve ser garantida, por outro a eficiência é critério fundamental para a sobrevivência das prestadoras de serviços de saneamento. Segundo Giacomello *et al.* (2013), um serviço de distribuição competente deve garantir níveis de pressão de água adequados aos clientes, níveis mínimos de água em tanques para garantir a confiabilidade do abastecimento e, além disso, a operação deve ser eficiente. Os autores ainda lembram que o comportamento hidráulico de sistemas de distribuição de água é não-linear, e o número de possíveis estratégias de operação se torna muito grande, tornando complexa sua operação, mormente pela grande quantidade de variáveis que compõe as tarifas elétricas e pelas exigências dos consumidores durante um ciclo operacional típico.

Nesta seção, uma revisão sobre os principais componentes dos SAA será apresentada, seguida da explicitação das formas de tarifação as quais os SAA estão sujeitos e finalmente, no item 2.1.3, as formas de modelagem hidráulica de SAA são discorridas.

2.1.1 Componentes de um SAA

Para bem compreender a pesquisa a ser exposta, torna-se imprescindível definir os principais componentes de SAA, os quais serão mencionados durante todo o texto. Segundo Tsutiya (2006), um SAA típico é composto por:

- a) Manancial – é o corpo de água superficial ou subterrânea de onde é retirada a água para o abastecimento;
- b) Captação – conjunto de estruturas e dispositivos dispostos junto ao manancial para retirada de água destinada ao abastecimento;
- c) Estação elevatória – conjunto de estruturas e dispositivos destinados ao recalque tanto de água bruta, quanto de água

tratada. Os denominados *boosters* são um subconjunto das estações elevatórias, destinados a aumentar a pressão ou vazão em partes do sistema;

- d) Adutora – canalização que se destina a conduzir água entre unidades antecedentes às redes de distribuição. Não distribuem água diretamente para consumidores;
- e) Estação de tratamento de água (ETA) – conjunto de unidades destinadas ao tratamento, de modo a adequar a água às condições de potabilidade;
- f) Reservatório – é o elemento do sistema destinado a regularizar as variações entre vazões de adução e de distribuição e condicionar pressões na rede de distribuição;
- g) Redes de distribuição – tubulações destinadas a disponibilizar a água potável aos consumidores, em quantidade e pressão recomendada.

Uma vez pontuados os termos que se farão presentes na pesquisa, parte-se para apresentação das formas de tarifação brasileira, aspecto necessário para compreensão da complexidade a que os SAA estão sujeitos.

2.1.2 Tarifação energética brasileira

De uma maneira genérica, as oportunidades para a racionalização energética na operação surgem em função de políticas praticadas pelas distribuidoras de energia no sentido de tarifar diferentemente o consumo ocorrido em diferentes períodos do dia (TOLEDO *et al.*, 2008)

As tarifas de energia elétrica são determinadas pela entidade que regula o setor elétrico brasileiro, denominada Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. A configuração atual do sistema tarifário brasileiro foi definida praticamente em um único instrumento legal: a resolução Nº 456/2000 da ANEEL.

Para efeito de faturamento, os consumidores são divididos em dois grupos, sendo o Grupo A de alta tensão e o Grupo B de baixa tensão. O Grupo A é composto por unidades consumidoras com tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3kV, ou atendidas por sistema subterrâneo de distribuição. O Grupo B é formado pelas unidades consumidoras com baixa tensão de fornecimento, inferior a 2,3kV.

Os consumidores do Grupo B (baixa tensão) estão sujeitos à tarifação monômnia, isto é, são cobrados apenas pela energia que consomem, enquanto que os consumidores do Grupo A são cobrados

tanto pela demanda quanto pela energia que consomem. As modalidades tarifárias disponíveis nesse caso são divididas em três categorias: convencional, horossazonal verde e horossazonal azul. Na modalidade convencional, a aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica se dá independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano. A tarifa convencional é aplicada por opção aos consumidores do Grupo A com tensão de fornecimento inferior a 69 kV desde que a demanda contratada seja inferior a 300 kW.

Nas modalidades horossazonal, as tarifas são diferenciadas de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, observando-se os seguintes aspectos:

- a) horário de ponta: período composto por três horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico. As Centrais Elétricas de Santa Catarina (Celesc) adotam como horário de ponta o período compreendido entre 18h30 e 21h30;
- b) horário fora de ponta: período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta;
- c) período úmido: período de cinco meses consecutivos referente aos fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte;
- d) período seco: período de sete meses consecutivos referente aos fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

A modalidade tarifária horossazonal verde é estruturada para aplicação de uma única tarifa de demanda (kW) ao passo que as tarifas de consumo (kWh) variam conforme o horário do dia e período do ano. Essa modalidade é aplicada por opção a todos os consumidores do Grupo A com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada igual ou superior a 300 kW.

A modalidade tarifária horossazonal azul é estruturada para aplicação de tarifas de demanda (kW), que variam de acordo com o horário do dia e tarifas de consumo (kWh) que variam conforme o horário do dia e período do ano. Essa modalidade é aplicada obrigatoriamente a todos os consumidores do Grupo A com tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV. Opcionalmente, pode ser aplicada a consumidores com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada igual ou superior a 300 kW.

A tabela a seguir resume as tensões e possibilidades de tarifação para cada (sub) grupo.

Tabela 1 – (Sub) Grupos, tensões de fornecimento e opções de tarifação

(Sub) grupos	Tensão de Fornecimento	Monômio	Convencional	H. Verde	H. Azul
A1	≥ 230 kV				X
A2	88 kV a 138 KV				X
A3	69 kV				X
A3a	30 kV a 44 kV		X	X	
A4	2,3 kV a 25 kV		X	X	
AS	Subterrâneo		X	X	
B	$<2,3$ kV	X			

Fonte: Elaboração do autor (2016)

2.1.3 Modelagem hidráulica de SAA

De acordo com D’ambrosio *et. al.* (2015), um SAA típico pode ser representado por:

- fontes: representadas por nós;
- consumidores: representados por nós, os quais devem ter seu balanço de fluxo respeitado, por meio da seguinte restrição:

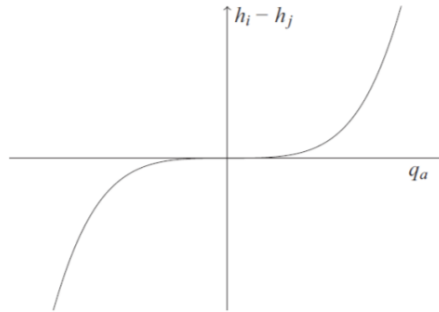
$$\sum_i q_{ij} - \sum_k q_{jk} = D_j \quad (1)$$

onde q_{ij} , q_{jk} e D_j representam os fluxos de chegada, fluxos que saem e a demanda de um dado nó j , respectivamente.

- tubulações: tipicamente representadas por arcos em uma rede, em que a água é transportada de um nó para outro, sendo que este fluxo é induzido por diferenças de potencial entre os nós. A equação fundamental para uma tubulação $a = (i, j)$ é a equação de perda de carga ou também denominada de fluxo potencial, a qual representa as perdas de potencial (pressão) por atrito em função do fluxo. A Figura 4 demonstra o

comportamento da perda de carga $h_i - h_j$ em função do fluxo q_a , caracterizando a curva de Hazen-Williams.

Figura 4 – Perda de carga em função do fluxo



Fonte: D'ambrosio *et. al.* (2015)

Segundo os autores, para determinação explícita das perdas de cargas podem ser usadas tanto a equação (2) de Darcy-Weisbach como a equação (3) de Hazen-Williams (H-W).

$$h_i - h_j = \frac{\text{sign}(q_a) q_a^2 8 L_a \lambda_a}{\pi^2 g D_a^5} \quad (2)$$

$$h_i - h_j = \frac{\text{sign}(q_a) |q_a|^{1,852} 10,7 L_a}{k_a^{1,852} D_a^{4,87}} \quad (3)$$

Ambas são funções do fluxo e incluem parâmetros como o comprimento do tubo L_a e seu diâmetro D_a . Em (1) tem-se o fator de atrito λ_a , o qual depende do número de Reynolds que por sua vez possui dependência com o fluxo, a qual costuma ser ignorada na maioria dos problemas tratados na literatura. Em (2) tem-se o coeficiente de rugosidade k_a , o qual é dependente do material da tubulação.

Segundo a NBR 12218, a pressão estática máxima nas redes de distribuição devem ser de 500 kPa, e a pressão dinâmica mínima, de 100 kPa. No entanto, adutoras e outros trechos que

- não abasteçam consumidores ou tubulações secundárias não estão sujeitos a tais limites;
- d) bombas: uma bomba é geralmente modelada como um arco $a=(i,j)$, no qual existe um fluxo q_a . Em comparação com tubulações, bombas têm um comprimento negligenciável e o fluxo através delas é geralmente restrito em sinal, isto é $q_a \geq 0$, permitindo somente fluxos de i para j . Geralmente, o fluxo através de uma bomba é considerado semi-contínuo, isto é, ou é nulo ou está em um intervalo $[\underline{q}_a, \bar{q}_a]$, com $\underline{q}_a > 0$. Isto já mostra a necessidade de uma variável binária para representar o estado da bomba. Uma importante questão em relação às bombas é o consumo de energia, o qual costuma aparecer na função objetivo. O consumo de energia pode ser modelado como proporcional ao produto do aumento de pressão devido à bomba pelo fluxo que passa por ela.
- e) tanques ou reservatórios: tanques tornam a operação da rede mais flexível, onde a demanda dos consumidores varia no tempo. A água pode ser estocada em um tanque durante um período de baixa demanda e pode ser extraída deles para satisfazer os picos de demanda. A água em um tanque normalmente não é pressurizada, o que significa que a pressão acima da água é zero, e o potencial hidráulico pode ser representado pela altura do tanque. Segundo Ghaddar *et al.* (2015), a pressão num tanque em um dado nó j , num dado tempo t pode ser descrita como segue:

$$P_{j,t} = P_{j,t-1} + \left(\frac{\sum_i q_{ij,t-1} - \sum_k q_{jk,t-1}}{A_j} \right) \Delta_T \quad (4)$$

onde A_j é a área de superfície do tanque e Δ_T é a duração do tempo.

- f) válvulas: assim como as bombas, uma válvula normalmente é modelada por um arco $a=(i,j)$ com comprimento negligenciável. As válvulas podem ser usadas para bloquear o fluxo completamente ou reduzir a pressão ou escoamento em

um sentido. Em ambos os casos, uma variável binária deve ser modelada para representar sua utilização ou não.

Tendo em vista as complexidades existentes na operação de SAA, recorrer ao uso de otimização para a programação de bombas pode ser eficaz para garantir um serviço confiável e, paralelamente, possibilitar a redução dos custos operacionais (GIACOMELLO *et al.*, 2013).

2.2 OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Conforme Sartori *et al.* (2014), a necessidade de contextualização do conhecimento visa o avanço do progresso científico e o desenvolvimento da ciência. Nesse sentido, para guiar a contextualização do tema e a busca sobre as tendências de pesquisa acerca da otimização da operação de SAA, foi realizada uma bibliometria utilizando o instrumento *Knowledge Development Process - Constructivist* - (Proknow-C), proposto por Ensslin *et al.* (2010) e Ensslin *et al.* (2012).

Os detalhes da condução da busca estão explicitados no Apêndice A e o portfólio de artigos resultante encontra-se no Apêndice B. A análise sistêmica do tema, a partir dos artigos do portfólio serão discutidas na sequência.

Em um dos artigos de revisão, presente no portfólio, os autores Coelho e Andrade-Campos (2014) dissertam sobre a evolução das técnicas de otimização aplicadas ao projeto e operação de SAA durante as últimas décadas. No entendimento dos referidos pesquisadores, as abordagens clássicas utilizadas em sistemas de distribuição de água compreendem: Programação Linear (PL); Programação Não Linear (PNL); Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM); e Programação Dinâmica (PD). Já do grupo de algoritmos heurísticos, os autores afirmam ser comum encontrar trabalhos que aplicam principalmente Algoritmos Genéticos (AG) e Algoritmos Evolutivos (AE), além de outras técnicas como Otimização por Enxame de Partículas (OEP), Busca Tabu (BT), Otimização por Colônia de Formigas (OCF), *Simulated Annealing* (SA), *Shuffled Complex Evolution* (SCE) e *Harmony Search* (HS).

De fato, no portfólio bibliográfico da presente pesquisa foram encontrados trabalhos envolvendo programação linear (GIACOMELLO *et al.*, 2013; PRICE E OSTFELD, 2013; VIEIRA E RAMOS, 2008;

2009), programação não linear (SAKARYA E MAYS, 2000), programação não linear inteira mista (BAGIROV *et al.*, 2013; GHADDAR *et al.*, 2015), algoritmos genéticos (COSTA, CASTRO, *et al.*, 2010; COSTA, RAMOS, *et al.*, 2010; JUNG *et al.*, 2014; KUREK E OSTFELD, 2014; MARTÍNEZ *et al.*, 2007; SALOMONS *et al.*, 2007; XU *et al.*, 2015), algoritmos de colônia das formigas (BABAEI *et al.*, 2015; LOPEZ-IBANEZ *et al.*, 2008), enxame de partículas (TANG *et al.*, 2014) e métodos heurísticos específicos (COHEN *et al.*, 2000; 2009; SELEK *et al.*, 2012). Foram encontradas ainda abordagens não explicitadas (BUNN, 2009; RAMOS *et al.*, 2010). No Quadro 2, a quantidade de cada tipo abordagem (preponderante) dentre os 22 artigos do portfólio é apresentada, excluindo-se da classificação o artigo de revisão. Já na Figura 5, apresenta-se um mapa conceitual das combinações de abordagens, no qual os retângulos representam a identificação dos artigos (Apêndice B) e as elipses representam as abordagens.

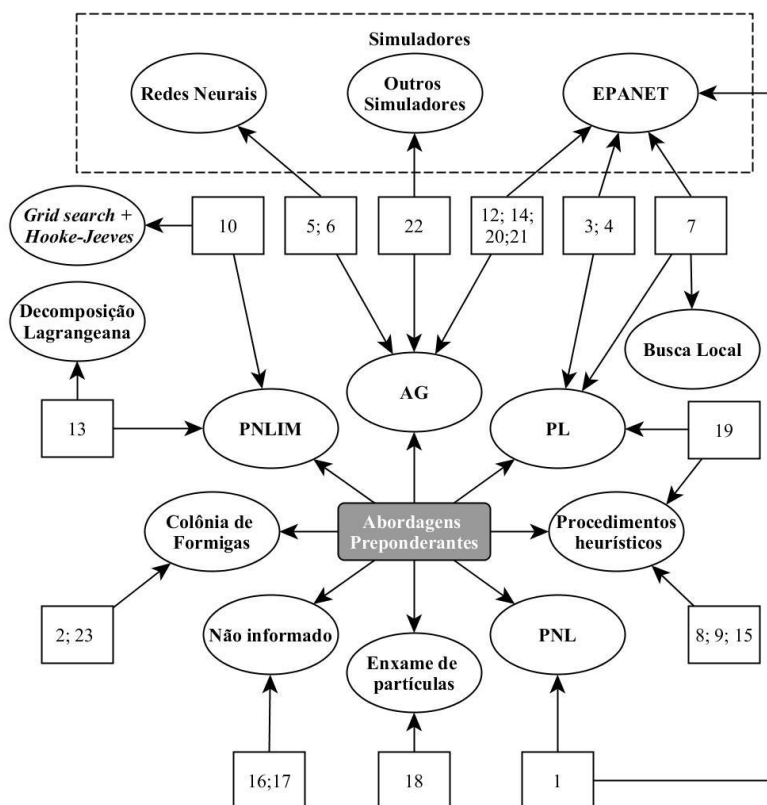
Quadro 2 – Abordagem preponderante dos artigos do portfólio

Abordagem preponderante	Nº de artigos do portfólio
Algoritmo genético (AG)	7
Programação Linear (PL)	4
Heurísticas	3
Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM)	2
Algoritmo de Colônia formigas (ACF)	2
Programação Não linear (PNL)	1
Enxame de partículas	1
Não informado	2
Elaboração do autor (2016)	

Ressalta-se que a maior parte dos artigos abordou a temática através de algoritmos genéticos (7), sendo que em cinco deles utilizou-se um simulador externo interagindo com o algoritmo. Dos 22 artigos, 11 trazem em sua abordagem algum tipo de simulador hidráulico interagindo com o procedimento de busca utilizado. Dentre os simuladores, o mais utilizado foi o software EPANET, aparecendo em oito artigos.

Em 12 artigos do portfólio, a função objetivo buscou minimizar somente custos variáveis de energia. Em quatro, observou-se a inclusão de custos de tratamento da água. Foram verificadas abordagens multiobjetivas em três deles, tratando do *trade-off* entre custos, confiabilidade e qualidade. Em um dos artigos, além dos custos variáveis de energia, incluiu-se a minimização do pico de consumo e, ainda, custos de manutenção na função objetivo. Apenas em um deles incluiu-se a minimização de desvios de concentração do valor esperado.

Figura 5 - Mapa conceitual das combinações de abordagens dos artigos do portfólio



Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Em sua revisão, Coelho e Andrade-Campos (2014) afirmam que alguns trabalhos tratam a otimização operacional dos sistemas de

bombeamento através da perspectiva de outros elementos da rede (formulação implícita), onde as variáveis de decisão podem ser representadas, por exemplo, pela variação dos níveis dos reservatórios. Este é o caso visto em Vieira e Ramos (2008; 2009), no qual os autores propõem modelos cujas variáveis de bombeamento são implícitas, sendo definidas a partir da variação dos níveis de reservatórios. Nesse caso, os modelos de otimização foram desenvolvidos em linguagem MATLAB com a intenção de maximizar a produção de energia por turbinas acopladas ao sistema de água e minimizar o consumo de energia por operações de bombeamento, com ou sem turbinas eólicas acopladas à estação de bombeamento. Importante salientar que os modelos de otimização não consideram pressões ao longo do sistema, mas tão somente através da interação com o software EPANET.

Coelho e Andrade-Campos (2014) ainda lembram que alguns pesquisadores examinam os problemas de otimização através de uma perspectiva multiobjetivo. É esta, por exemplo, a metodologia aplicada por Kurek e Ostfeld (2014), que propõem um algoritmo genético multiobjetivo para minimizar custos operacionais de bombas e de qualidade da água, enquanto satisfaz restrições de quantidade, de armazenamento e de confiabilidade. O modelo considera também a possibilidade de ocorrer variações das tarifas de energia ao longo do dia. O comportamento do algoritmo foi explorado sob diferentes tarifas de energia, e investigou os *trade-offs* existentes entre as funções objetivos. Isto foi possível em razão da abordagem multiobjetiva, sem a atribuição de pesos arbitrários, a priori, para os objetivos. É de se salientar, no entanto, que uma maior limitação do modelo proposto consiste no fato da variável de velocidade das bombas ter sido considerada contínua, permitindo quaisquer valores de operação, o que, em geral, não corresponde às possibilidades encontradas em SAA.

Lopez-Ibanez *et al.* (2008) propõem um Algoritmo da Colônia de Formigas (ACF) para tratar o problema da otimização da operação de sistemas de distribuição de água. O método considera, além do custo de energia variável na função objetivo, uma penalização proporcional ao pico de energia utilizado. Outro ponto relevante é que a abordagem proposta não minimiza o número de ligações de bomba, mas sim limita seu valor a um número máximo predefinido de ligações da bomba, balizando assim o uso e desgaste das bombas e os custos de manutenção. Como consequência, o espaço de busca pôde ser significativamente reduzido. Os autores afirmam ainda que, para uma grande aplicação real, o algoritmo proposto supera um algoritmo

genético simples em termos de custo de energia, do número de ligações da bomba, e do tempo de computação.

Dois dos artigos do portfólio fazem parte do projeto de pesquisa denominado POWADIMA (*Potable Water Distribution Management*), no qual foram aplicados modelos para redes de distribuição de água em dois estudos de caso. O primeiro foi realizado em Haifa, no norte de Israel (SALOMONS *et al.*, 2007), e o segundo em Valência, no leste da Espanha (MARTÍNEZ *et al.*, 2007).

Em Martínez *et al.* (2007) foi proposto um sistema de controle através de um algoritmo genético dinâmico e de redes neurais artificiais preditoras, em vez do modelo EPANET, o que resultou em um modelo de simulação 25 vezes mais rápido. O objetivo do modelo é buscar o melhor controle de configurações das bombas e válvulas em um horizonte rolante de operação de 24 horas. Os autores abordaram o problema na cidade de Valência, a qual tinha uma particularidade em relação a outros problemas tratados na literatura, que consideram apenas custos de energia como mais relevantes. Na cidade, há duas fontes de abastecimento com custos significativamente diferentes de produção e, portanto, neste caso particular, os custos operacionais relevantes são os custos de energia e os custos combinados de produção incorridos ao longo do horizonte operacional. Em Salomons *et al.* (2007), através do mesmo projeto, o modelo é aplicado na cidade de Haifa, norte de Israel, resultando em uma redução potencial de custo de 25%.

Sakarya e Mays (2000) modelam três diferentes funções objetivo para resolver o problema de operação de bombas com considerações de qualidade da água, minimizando: a) tempo operacional total; b) custo de produção total; c) desvios de concentração de substâncias satisfazendo considerações de qualidade de água, desconsiderando fatores operacionais ou econômicos. Na pesquisa, o método Lagrangeana aumentado foi usado como forma de penalidade da função objetivo.

Segundo D'ambrosio *et al.* (2015), uma abordagem simplista para o problema de operação de SAA seria considerá-lo como um problema de fluxo em redes, cujas variáveis de decisão apenas indiquem o fluxo das fontes para os consumidores. Ainda segundo os autores, ao introduzir variáveis de pressão e de decisões discretas ao longo do tempo, obtêm-se ganhos de precisão, mas em contrapartida passam-se a ter modelos de otimização no contexto de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM). Na última década, as abordagens por PNLIM têm experimentado crescente popularidade, enquanto historicamente, problemas de otimização relacionados a redes de água foram atacados predominantemente por métodos (meta) heurísticos, sem utilizar

explicitamente uma formulação de programação matemática (D'AMBROSIO *ET AL.*, 2015).

Com efeito, dois dos artigos mais recentes do portfólio analisaram o problema utilizando a abordagem por PNLIM. Em Bagirov *et al.* (2013), o problema é formulado como um problema de PNLIM e um algoritmo é desenvolvido para a sua solução. Este algoritmo baseia-se na combinação de *grid search*, com o método padrão de pesquisa Hooke-Jeeves interagindo com o simulador EPANET. Já em Ghaddar *et al.* (2015), uma das abordagens mais completas encontradas no portfólio de artigos é apresentada, dispensando o uso de simuladores externos por meio de uma formulação PNLIM para o problema de agendamento de bombas. Nesta abordagem, a rede de água consiste em um conjunto de nós ligados por tubos (ou links). Os nós são compostos por três subconjuntos: reservatórios (ou fontes de água), tanques utilizados para armazenar água e junções que conectam os nós e que podem ter uma demanda. As bombas são um subconjunto das tubulações que são utilizadas para aumentar a pressão no interior da rede através da geração de fluxo de água em quantidade suficiente para satisfazer a demanda. Os autores ainda supõem que um tubo não pode conter mais do que uma bomba e as bombas têm uma velocidade constante, assumindo que o horizonte de planejamento é dividido em períodos de tempo iguais, e a demanda de água deve ser satisfeita em cada período. No Quadro 3 é possível visualizar a terminologia adotada.

Quadro 3 – Parâmetros do modelo proposto por Ghaddar *et al.* (2015)

Parâmetros:	Conjuntos:
C_t : Custo de energia elétrica no período t	N: Conjunto de tubulações
γ : Peso específico da água	P: Conjunto de tubulações contendo bombas
η_{ij} : Eficiência da bomba instalada na tubulação (i,j)	R: Conjunto de reservatórios (fontes)
$Q_{i,j}^U$: Máximo fluxo através da tubulação (i,j)	K: Conjunto de tanques
D_{jt} : Demanda na junção j no período t ;	J: Conjunto de junções
E_i : Altura do nó i em relação ao nível do mar	T: Conjunto de períodos

P_j^L : Mínimo nível de água do tanque j	
P_j^U : Máximo nível de água do tanque j	
A_j : Área de superfície do tanque j	
Δ_T : Duração de cada período	

Fonte: Ghaddar *et al.* (2015)

As variáveis de decisão do modelo proposto são as que seguem:

q_{ijt} : Fluxo do link (i,j) no período t;

h_{ijt} : Perda de carga no link (i,j) no período t;

p_{it} : Pressão no nó i no período t;

$s_{ijt} = 1$ se a bomba do link (i,j) está ligada no período t;

0 caso contrário.

O modelo é descrito, então, como segue:

$$\min \sum_t^T \sum_{(i,j) \in P} \frac{\gamma C_t \Delta_T}{\eta_{ij}} h_{ijt} q_{ijt} \quad (5)$$

$$q_{ijt} \leq Q_{ij}^U \quad \forall (i,j) \in N/P, \forall t \in T \quad (6)$$

$$q_{ij,t} \leq s_{ij,t} Q_{ij}^U \quad \forall (i,j) \in P, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_i q_{ij,t} - \sum_k q_{jk,t} = D_{j,t} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (8)$$

$$q_{ijt} ((p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) - h_{ijt}) \geq 0 \quad \forall (i,j) \in N/P, \forall t \in T \quad (9)$$

$$(p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) - h_{ijt} \leq 0 \quad \forall (i,j) \in N/P, \forall t \in T \quad (10)$$

$$s_{ijt} ((p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) - h_{ijt}) = 0 \quad \forall (i,j) \in P, \forall t \in T \quad (11)$$

$$h_{ijt} = (a_{ij} q_{ij,t}^2 + b_{ij} q_{ij,t} + c_{ij}) \quad \forall (i,j) \in N, \forall t \in T \quad (12)$$

$$P_{j,t}^L \leq p_{j,t} \leq P_{j,t}^U \quad \forall j \in K, \forall t \in T \quad (13)$$

$$p_{j,t} = p_{j,t-1} + \left(\frac{\sum_i q_{ij,t-1} - \sum_k q_{jk,t-1}}{A_j} \right) \Delta_T \quad \forall j \in K, \forall t \in T \quad (14)$$

$$q_{ij,t} \geq 0, s_{ij,t} \in \{0,1\}. \quad (15)$$

A função objetivo (5) minimiza o consumo de energia. A restrição (6) impõe um limite superior para o fluxo em cada tubulação, enquanto a restrição (7) impõe que só haja fluxo em uma dada tubulação se a bomba correspondente estiver ligada. A restrição (8) garante a conservação do fluxo de água, enquanto que em que as restrições de (9) a (12) representam as restrições de conservação de energia, baseadas nas propriedades hidráulicas do sistema. As restrições (9) e (11) são apenas impostas quando as correspondentes variáveis $q_{ij,t}$ são positivas, caso contrário são redundantes. A Equação (12) representa a perda de carga em uma dada tubulação e é assumida como função quadrática, onde a_{ij} , b_{ij} e c_{ij} são coeficientes dependentes das características físicas das tubulações. As restrições (13) representam os mínimos e máximos níveis nos tanques. As restrições (14) correspondem às equações de balanço de massa. Finalmente, as restrições (15) definem as variáveis binárias e a não negatividade.

Em virtude do problema ser de difícil resolução por pacotes de otimização padrão e sem garantia de otimalidade, os autores propõem uma decomposição Lagrangeana que explora a estrutura do problema. Para avaliar o desempenho do método de decomposição Lagrangeana, os autores o comparam com uma formulação por Programação Linear Inteira Mista (PLIM) obtida através da linearização das equações não lineares. Neste caso, o método proposto obteve soluções melhores e mais rápidas que a formação por (PLIM).

Apesar de os modelos de PNLIM serem uma das formas que melhor conseguem representar o problema da operação de SAA, dentre os de programação matemática, muitos trabalhos recorrem a adaptações e simplificações da abordagem por PNLIM (GHADDAR *et al.* (2015); GEIBLER *et al.*, (2012)

Nesse sentido, na sequência serão dedicadas algumas sessões para explicitar os métodos mais utilizados para solucionar modelos de PNLIM.

2.3 MÉTODOS DE SOLUÇÃO DE PNLIM

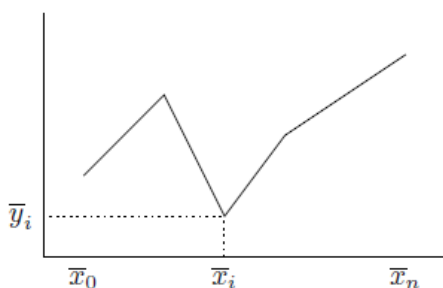
D'ambrosio *et al.* (2015) explanam sobre quatro dos métodos mais frequentemente utilizados para solucionar problemas de PNLIM: a) *branch and bound* não linear; b) *branch and bound* baseado em PL/PNL; c) *branch and bound* espacial e d) aproximações e relaxações lineares de *piecewise*. Os autores apontaram que os três primeiros métodos são mais atrativos quando se está diante de um problema convexo e que o último se torna mais interessante nos modelos não convexos, além de permitir a utilização de solucionadores para PLIMs.

Tendo em vista a natureza não convexa típica dos SAA (D'AMBROSIO *et al.*, 2015), na sequência serão revisadas as aproximações e relaxações lineares de *piecewise* para modelos PNLIM.

2.3.1 Aproximações de *piecewise* para modelos de PNLIM

Uma função linear de *piecewise* $\phi: \Re \rightarrow \Re$ pode ser definida por $n+1$ vértices $\bar{x}_i (i \in \{0, \dots, n\})$ e os respectivos valores da função $\bar{y}_i = \phi(\bar{x}_i)$, totalizando n segmentos de reta (GEIßLER *et al.*, 2012). Na Figura 6 é apresentado um exemplo de função linear de *piecewise*.

Figura 6 – Exemplo de função linear de *piecewise*



Fonte: Geißler *et al.*, (2012)

Geißler *et al.* (2012) comparam cinco métodos utilizados para transformar funções não lineares em funções lineares de *piecewise*.

A ideia dos autores é formular um modelo de PLIM para representar uma dada geometria da função linear de *piecewise*, a qual por sua vez é a aproximação de uma função não linear. Os métodos revisados foram:

a) Método da combinação convexa; b) Método incremental; c) *Special*

Ordered Sets (SOS); d) Combinação convexa logarítmica; e e) Combinação convexa desagregada logarítmica.

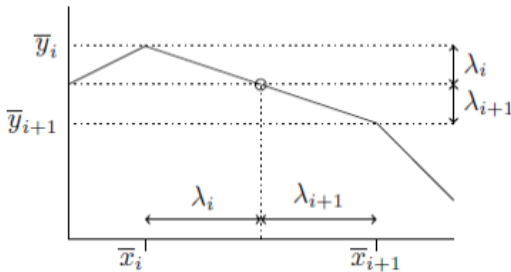
Os métodos foram testados em dois problemas, sendo um deles relacionado à operação de sistemas de água e um segundo relacionado à operação de sistemas de transporte de gás. Os resultados mais rápidos foram obtidos com o método incremental, embora este resultado não seja passível de generalização.

Deste modo, na sequência serão discutidos dois dos métodos revisados por Geißler *et al.* (2012).

2.3.1.1 Método de combinação convexa

O método de combinação convexa se baseia no princípio de que, se ϕ é uma função linear de *piecewise*, é possível calcular o valor da função em qualquer ponto x por meio da combinação convexa dos nós vizinhos (DANTZIG, 1960). A Figura 7 ilustra o mecanismo do método, o qual será detalhado na sequência.

Figura 7 – Método de combinação convexa



Fonte: Geißler *et al.* (2012)

Geißler *et al.* (2012) definem o seguinte modelo para expressar uma função de *piecewise* $y = \phi(x)$:

Seja $z_i \in \{0,1\}$ a variável que indica a ativação do trecho i da função de *piecewise*,

$$x = \sum_{i=0}^n \lambda_i \bar{x}_i \quad (16)$$

$$y = \sum_{i=0}^n \lambda_i \bar{y}_i \quad (17)$$

$$\sum_{i=0}^n \lambda_i = 1 \quad (18)$$

$$\lambda \geq 0 \quad (19)$$

$$\lambda_0 \leq z_1 \quad (20)$$

$$\lambda_n \leq z_n \quad (21)$$

$$\lambda_i \leq z_i + z_{i+1} \quad \forall i \in \{1, \dots, n-1\} \quad (22)$$

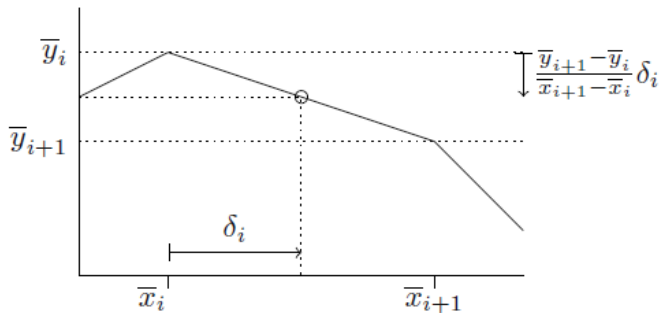
$$\sum_{i=1}^n z_i \leq 1 \quad (23)$$

2.3.1.2 Método incremental

O método incremental foi proposto inicialmente por Markowitz e Manne (1957) e se baseia na utilização de vértices consecutivos da função de *piecewise* para determinar a inclinação dos segmentos de reta. Novamente Geißler *et al.* (2012) exemplificam sua utilização na Figura 8, onde o valor da função pode ser definido como $y = \frac{\bar{y}_i - \bar{y}_{i-1}}{\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}} \delta$. Eles

usam um conjunto de variáveis δ_i para cada intervalo i com o intuito de determinar o valor x no dado intervalo, sendo que $0 \leq \delta_i \leq \bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}$.

Figura 8 – Método incremental



Fonte: Geißler *et al.* (2012)

O modelo é então descrito como segue:

$$x = \bar{x}_0 + \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (24)$$

$$y = \bar{y}_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{y}_i - \bar{y}_{i-1}}{\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}} \delta_i \quad (25)$$

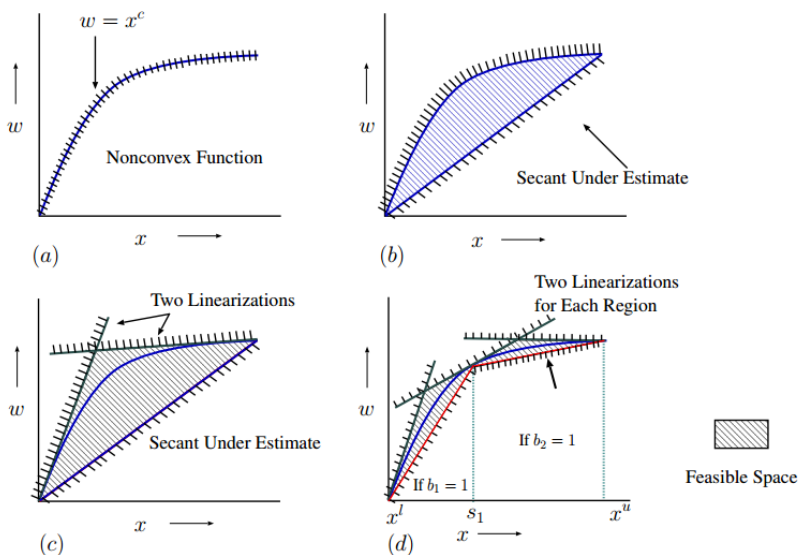
$$(\bar{x}_{i-1} - \bar{x}_{i-2})z_{i-1} \leq \delta_i \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (26)$$

$$(\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1})z_i \geq \delta_i \quad \forall i \in \{1, \dots, n-1\} \quad (27)$$

2.3.2 Relaxações de *piecewise* para modelos de PNLIM

Polisetty e Gatzke, (2005) elucidam um intuitivo método, esquematizado na Figura 9 onde, partindo de uma função não linear (a), define-se uma reta secante com valores subestimados da curva original (b), definem-se retas externas a concavidade, com valores superestimados (c) e por fim, cria-se um novo vértice (d), restringindo o espaço subestimado da curva original, mediante a criação de uma nova variável binária. A lógica utilizada pelos autores consiste na utilização de variáveis binárias para ativar uma das regiões, ou o conjunto de retas que as definem.

Figura 9 – Método de Polisetty e Gatzke



Fonte: Polisetty e Gatzke, (2005)

Como no exemplo ilustrado só há uma concavidade, as equações de reta externas à concavidade podem estar sempre ativas, o que não seria válido caso houvessem pontos de inflexão, como no caso da equação de Hazen-Williams, a qual contém um ponto de inflexão em zero, o que exige que se desative as retas limitantes externas à concavidade quando o fluxo não está no respectivo quadrante, sob pena de eliminar regiões válidas no quadrante oposto.

2.3.3 Comparativo entre relaxações e aproximações de *piecewise*

Na comparação de Geißler *et al.* (2012), relaxações e aproximações de *piecewise* não diferiram muito no que tange aos tempos de computacionais, sendo que enquanto uma solução viável foi encontrada mais rapidamente em um, no outro a convergência se deu de forma mais veloz.

Por outro lado os autores reconheceram algumas vantagens da utilização da relaxação em relação a aproximação: 1) qualquer limitante inferior da função objetivo do modelo relaxado encontrado pelo solucionador será válido para o problema original; 2) Caso o modelo relaxado não tenha solução, o modelo original também não o terá.

Polisetty e Gatzke, (2005) ressaltam também a vantagem de que qualquer solução trivial para o problema original é solução para o problema relaxado e serve como limitante superior da função objetivo do problema relaxado.

2.3.4 Linearização do produto de variáveis binárias e contínuas

Tendo em vista que o produto de uma variável binária por outra contínua é compreendida como uma não linearidade em modelos de PLIM e que é usual encontrar produtos como este em problemas de SAA, dedicou-se esta sessão à sua linearização.

Bisschop (2006) demonstra como linearizar um produto envolvendo variáveis binárias e contínuas. O método consiste em transformar as duas variáveis multiplicadas em uma nova variável. A seguir, o mesmo exemplo utilizado pelo autor é apresentado.

Seja:

x_1 : variável binária

x_2 : variável contínua, limitada por $[0, \bar{u}]$

$$y = x_1 x_2 \quad (28)$$

Assim, y pode ser expresso como:

$$y \leq \bar{u} x_1 \quad (29)$$

$$y \leq x_2 \quad (30)$$

$$y \geq x_2 - \bar{u}(1 - x_1) \quad (31)$$

$$y \geq 0 \quad (32)$$

Coelho (2016) demonstra como generalizar este produto, ainda que a variável contínua não seja limitada por zero, ou seja, x_2 limitado por $[\underline{u}, \bar{u}]$. Para o caso demonstrado acima, a seguinte formulação seria necessária:

$$\min\{\underline{u}, \underline{u}\} \leq y \leq \bar{u} \quad (33)$$

$$\underline{u} x_1 \leq y \leq x_1 \bar{u} \quad (34)$$

$$x_2 - (1 - x_1) \bar{u} \leq y \leq x_2 - (1 - x_1) \underline{u} \quad (35)$$

$$y \leq x_2 + (1 - x_1)\bar{u} \quad (36)$$

2.3.5 Técnicas para redução da complexidade de modelos PLIM

Nesta sessão serão revisadas duas formas de reduzir a complexidade de problemas de PLIM na formulação do modelo matemático.

2.3.5.1 Inequações válidas

Günlük e Pochet (2001) afirmam que um passo importante para solucionar um modelo de PLIM consiste em definir inequações válidas, as quais são chamadas de cortes. O autor afirma ainda que tais cortes podem ser: a) gerais, os quais independem das características específicas dos problemas, tais como os cortes de Gomory¹ ou os planos de corte disjuntivos²; b) específicos, os quais podem ser baseados na análise poliedral da formulação do problema ou, em virtude da dificuldade usual de capturar toda a estrutura do problema, comumente recorre-se à inserção de estruturas matemáticas na formulação do problema.

Como o objetivo deste trabalho não consiste no desenvolvimento de cortes gerais para qualquer problema, uma vez que se utilizarão solucionadores comerciais na consecução da pesquisa, fará parte do escopo deste trabalho somente o desenvolvimento de inequações válidas específicas para o problema da operação de SAA.

2.3.5.2 Simetrias

Para Liberti (2012), simetrias são exploradas em programação matemática a fim de se reduzir os tempos de convergências na obtenção de solução ótimas.

O autor resume que a abordagem mais comum para reduzir a complexidade de problemas por meio de simetrias baseia-se em: (a) encontrar simetrias para o problema em questão; (b) reformular o problema, de modo que ele não permita algumas das soluções simétricas; (c) resolver o problema modificado.

¹ Tradução livre para *Gomory mixed-integer cuts*

² Tradução livre para *Disjunctive cutting planes*

Existem ainda formas de simetrias genéricas, usualmente embutidas em solucionadores comerciais, as quais não serão desenvolvidas nesta pesquisa e, portanto, não revisadas nesta sessão.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Dentre as abordagens disponíveis para a redução dos custos operacionais relacionados aos sistemas de abastecimento de água, observou-se que os algoritmos genéticos têm sido os mais utilizados, estando presentes em sete dos 22 artigos (desconsiderando o de revisão) do portfólio. Constatou-se ainda que em 50% dos artigos, os modelos propostos necessitavam interagir com softwares de simulação para convergir para uma solução e garantir uma solução viável.

Por outro lado, verificou-se que nos últimos anos as abordagens por Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) têm ganhado a atenção de pesquisadores, sendo uma possível tendência para pesquisas futuras. Tal abordagem esteve presente em dois recentes trabalhos do portfólio. Uma em Bagirov *et al.* (2013) e outra em Ghaddar *et al.* (2015), nos quais apresentou-se uma modelagem que dispensou a interação com modelos de simulação e obteve-se um bom resultado entre custo computacional e desempenho da solução.

Por outro lado, a resolução de problemas de PNLIM são reconhecidamente difíceis quando se trata de problemas não convexos, os quais têm como uma das abordagens recomendadas, a linearização de *piecewise*. Nesse sentido, no presente capítulo revisaram-se os principais métodos de linearização, dando destaque para as relaxações de *piecewise*, as quais trazem vantagens em relação às aproximações de *piecewise*.

3 MODELOS MATEMÁTICOS E TÉCNICA DE SOLUÇÃO PROPOSTA

Neste capítulo serão apresentadas duas formulações matemáticas e um conjunto de simplificações viáveis para uma das formulações.

A primeira formulação será uma adaptação da proposta de Ghaddar *et al.* (2015), a qual passará a englobar aspectos hidráulicos gerais não considerados e, ainda, questões específicas sobre as tarifações energéticas brasileiras, sem que isso implique na inaplicabilidade do modelo aqui proposto em outros contextos onde a forma de tarifação brasileira não se faça presente.

A segunda formulação consiste em uma relaxação linear da primeira, a qual resultará em uma formulação por PLIM. Por fim, o capítulo trará um conjunto de simplificações para a formulação por PLIM que visará contribuir para a velocidade de convergência das soluções.

3.1 FORMULAÇÃO POR PNLIM

A abordagem por PNLIM será baseada em Ghaddar *et al.* (2015) com as seguintes adaptações:

- a) inclusão da possibilidade de desacoplamento das tubulações que conduzem água até os tanques quando os mesmos encontram-se cheio e caso o fluxo seja no sentido para dentro do tanque;
- b) inclusão de equações que representem questões relativas à contratação de demandas energéticas, de modo que o modelo possa representar também o caso das tarifações brasileiras, além de outros países onde também se pague pelo pico de energia consumido;
- c) alteração do parâmetro de custo de energia C_t para C_{ijt} , de modo que se possam utilizar diferentes tarifações para cada bomba em cada intervalo de tempo;
- d) alteração das equações aproximadas de perda de carga (8) para o formato proposto por Hazen-Williams (3), de modo a reduzir o erro que a aproximação incorre;
- e) inclusão do conjunto de nós com demandas maiores que zero nas restrições (13), de modo que se possa representar também a legislação brasileira, a qual impõe um limite mínimo de pressão dinâmica de 100 kPa.

Para prosseguir com as adaptações, se faz necessário, portanto, redefinir o modelo.

Sejam os seguintes conjuntos:

N : Conjunto de tubulações

$P \subset N$: Subconjunto de tubulações contendo bombas

$P^A \subset P$: Subconjunto de tubulações contendo bombas sujeitas à tarifação horosazonal Azul

$P^V \subset P$: Subconjunto de tubulações contendo bombas sujeitas à tarifação horosazonal Verde

$P^C \subset P$: Subconjunto de tubulações contendo bombas sujeitas à tarifação convencional

$V \subset N$: Subconjunto de tubulações contendo válvulas

A : conjunto de todos os nós

$K \subset A$: Subconjunto de nós com tanques

$J \subset A$: Subconjunto de nós com junções

$R \subset A$: Subconjunto de nós contendo mananciais de água

T : Conjunto de todos períodos

$T^P \subset T$: Subconjunto de períodos contendo os horários de ponta

Sejam os seguintes parâmetros:

γ : Peso específico da água [N/m^3]

$Q_{i,j}$: Máximo fluxo através da tubulação (i,j) [m^3/h]

D_{jt} : Demanda na junção j no período t [m^3/h]

E_i : Altura do nó i [m]

P_i^L : Mínima pressão do nó i acima do nível do terreno [m]

P_i^U : Máxima pressão do nó i acima do nível do terreno [m]

P_{rt} : Pressão no manancial r no período t [m]

B_k : Limite aceito acima da capacidade do tanque [m]

A_j : Área de superfície do tanque j [m^2]

Δ_T : Duração de cada período [h]

L_{ij} : Comprimento da tubulação (i,j) [m]

R_{ij} : Raio da tubulação (i,j) [m]

K_{ij} : Coeficiente de Hazen-Williams da tubulação (i,j)

C_{ijt}^C : Custo da energia elétrica consumida na bomba do link (i,j) no período t [unidades monetárias/ kW]

C_{ij}^{DaP} : Custo da energia elétrica demandada para os horários de ponta da tarifação horosazonal Azul, para a bomba do link (i,j) [unidades monetárias/ kW];

C_{ij}^{DaFP} : Custo da energia elétrica demandada para os horários fora de ponta da tarifação horosazonal Azul, para a bomba do link (i,j) [unidades monetárias/ kW];

C_{ij}^{DV} : Custo da energia elétrica demandada da tarifação horosazonal Verde, para a bomba do link (i,j) [unidades monetárias/ kW];

C_{ij}^{DC} : Custo da energia elétrica demandada da tarifação Convencional, para a bomba do link (i,j) [unidades monetárias/ kW];

M: Número de dias do mês a ser otimizado

As variáveis de decisão do modelo modificado são as que seguem:

q_{ijt} : Fluxo do link (i,j) no período t [m^3/h];

h_{ijt} : Perda de carga no link (i,j) no período t [m];

p_{it} : Pressão no nó i no período t [m].

p'_{it} : Variável auxiliar de pressão no nó i no período t [m].

$s_{ijt} = 1$ se o link (i,j) está ativo no período t;

0 caso contrário.

$f_{it} = 1$ se o tanque do nó i inicia cheio no período t;

0 caso contrário.

a_{ij}^P = demanda contratada para os horários de ponta, para a bomba do link (i,j) sujeita à tarifação horosazonal azul [kW].

a_{ij}^{FP} = demanda contratada para os horários fora de ponta, para a bomba do link (i,j) sujeita à tarifação horosazonal azul [kW].

v_{ij} = demanda contratada para a bomba do link (i,j), sujeita à tarifação horosazonal verde [kW].

c_{ij} = demanda contratada para a bomba do link (i,j), sujeita à tarifação convencional [kW].

O modelo pode ser reescrito, então, como segue:

$$\min \sum_t^T \sum_{(i,j) \in P} \frac{\gamma C_{ijt}^C \Delta_T}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{ij}} h_{ij,t} q_{ij,t} + \left(\sum_{(i,j) \in P^A} C_{ij}^{DaFP} a_{ij}^{FP} + \sum_{(i,j) \in P^A} C_{ij}^{DaP} a_{ij}^P + \sum_{(i,j) \in P^V} C_{ij}^{DV} v_{ij} + \sum_{(i,j) \in P^C} C_{ij}^{DC} c_{ij} \right) / M \quad (37)$$

$$\frac{\gamma \Delta_T}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{ij}} h_{ij,t} q_{ij,t} \leq a_{ij}^P \quad \forall (i,j) \in P^A, \forall t \in T^P \quad (38)$$

$$\frac{\gamma \Delta_T}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{ij}} h_{ij,t} q_{ij,t} \leq a_{ij}^{FP} \quad \forall (i,j) \in P^A, \forall t \in T / T^P \quad (39)$$

$$\frac{\gamma \Delta_T}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{ij}} h_{ij,t} q_{ij,t} \leq v_{ij} \quad \forall (i,j) \in P^V, \forall t \in T \quad (40)$$

$$\frac{\gamma \Delta_T}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{ij}} h_{ij,t} q_{ij,t} \leq c_{ij} \quad \forall (i,j) \in P^C, \forall t \in T \quad (41)$$

$$q_{ijt} \leq Q_{ij} \quad \forall (i,j) \in N / (P \cup V \cup (\forall i \in K)), \forall t \in T \quad (42)$$

$$q_{ij,t} \leq s_{ij,t} Q_{ij} \quad \forall (i,j) \in (P \cup V \cup (\forall i \in K)), \forall t \in T \quad (43)$$

$$\sum_i q_{ijt} - \sum_k q_{jkt} = D_{j,t} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (44)$$

$$q_{ij,t} ((p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) - h_{ij,t}) \geq 0 \quad \forall (i,j) \in N / (P \cup V \cup (\forall i \in K)), \forall t \in T \quad (45)$$

$$s_{ij,t}((p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) + h_{ij,t}) = 0 \quad \forall(i, j) \in P, \forall t \in T \quad (46)$$

$$s_{ij,t}((p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) - h_{ij,t}) = 0 \quad (47)$$

$$\forall(i, j) \in (V \cup (\forall i \in K)), \forall t \in T$$

$$(p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) - h_{ij,t} \leq 0 \quad \forall(i, j) \in N/P, \forall t \in T \quad (48)$$

$$h_{ij,t} = \frac{(q_{ij,t}^{1,852} / 3600) 10,64 L_{ij}}{k_{ij}^{1,852} (2R_{ij})^{4,87}} \quad \forall(i, j) \in N/P, \forall t \in T \quad (49)$$

$$h_{ij,t} = \tau(q_{ij,t}) \quad \forall(i, j) \in P, \forall t \in T \quad (50)$$

$$\eta_{ij} = \phi(q_{ij,t}) \quad \forall(i, j) \in P, \forall t \in T \quad (51)$$

$$P_{i,t}^L \leq p_{i,t} \leq P_{ij,t}^U \quad \forall i \in A/R, \forall t \in T \quad (52)$$

$$p_{i,t} = P_{\pi} \quad \forall i \in R, \forall t \in T \quad (53)$$

$$p'_{j,t} = p_{j,t-1} + \left(\frac{\sum_i q_{ij,t-1} - \sum_k q_{jk,t-1}}{A_j} \right) \Delta_T \quad \forall j \in K, \forall t \neq 1 \quad (54)$$

$$p'_{j,1} \leq p_{j,24} + \left(\frac{\sum_i q_{ij,24} - \sum_k q_{jk,24}}{A_j} \right) \Delta_T \quad \forall j \in K \quad (55)$$

$$p'_{jt} \leq P_j^U + f_{jt} B_j \quad \forall j \in K, \forall t \in T \quad (56)$$

$$p'_{jt} \geq P_j^U f_{jt} \quad \forall j \in K, \forall t \in T \quad (57)$$

$$s_{ijt} \geq 1 - f_{jt} \quad \forall i \in K, \forall t \in T \quad (58)$$

$$f_{jt} P_j^U = f_{jt} p_{jt} \quad \forall j \in K, \forall t \in T \quad (59)$$

$$p_{jt} (1 - f_{jt}) = p'_{jt} (1 - f_{jt}) \quad \forall j \in K, \forall t \in T \quad (60)$$

$$q_{ij,t} \geq 0, s_{ij,t} \in \{0,1\} \quad (61)$$

A função objetivo (37) minimiza os custos diários de consumo energético e os custos com demanda contratada para o mês, ponderado por $1/M$, de modo a equiparar os períodos de custos dos termos da função objetivo. As restrições de (38) a (41) impõem que o consumo energético máximo de cada bomba, em qualquer período seja menor que a demanda contratada. As inequações (42) impõe um limite superior

para o fluxo em cada tubo, enquanto que as inequações (43) garantem que o fluxo em bombas, válvulas ou tubulações ligadas aos tanques ocorram somente mediante a ativação da variável s_{ijt} . As restrições (44) asseguram a conservação do fluxo de água em um determinado nó, enquanto que as restrições (45) a (48) representam as restrições de conservação de energia, relacionadas com as propriedades hidráulicas do sistema. As restrições (45) garantem que nunca haja fluxo de i para j e de j para i , ao mesmo tempo, e que o fluxo respeite a conservação de energia. Equações (46) garantem que o fluxo através da bomba está em conformidade com a lei de conservação de energia para os arcos com bombas e as equações (47) asseguram a conservação de energia para tubos com válvulas e saídas de tanques. As restrições (48) garantem que, quando o fluxo tende de i para j , por conta de que a pressão somada à cota em i serem maiores que em j , seja obrigatório haver um valor de h_{ijt} positivo e um consequente q_{ijt} nesse sentido. Caso não houvesse esse grupo de equações, o modelo ficaria livre para zerar os valores de fluxos nas restrições (45) e h_{ijt} nas restrições (47), as quais representam a conservação de energia em válvulas, em tubulações que saem dos tanques e em tubulações comuns. As equações (49) representam as perdas de carga de Hazen-Williams (HW) em uma determinada tubulação, ao passo que as equações (50) representam funções genéricas, usualmente não lineares de ganho de carga fornecidas pelos fabricantes das bombas. As equações (51) representam as funções genéricas de rendimento em função do fluxo, também usualmente não lineares. As restrições (52) representam a pressão mínima e máxima em nós sem fontes de água, os quais por suas vezes têm a sua pressão definidos pelas equações (53). As igualdades (54) correspondem às equações de balanço de massa e (55) impõem que os níveis finais dos tanques sejam maiores que os níveis iniciais. As equações (56) e (57) permitem que a variável auxiliar de pressão exceda o limite máximo do tanque desde que a variável f_{jt} seja igual a um. Neste caso, devido ao tanque finalizar cheio, no período seguinte o modelo deve permitir o devido desacoplamento das tubulações, caso o fluxo tenda para dentro dos tanques e deve obrigar o acoplamento novamente, quando o fluxo tenda para fora dos tanques. É o que é garantido pelas equações (58) que permitem o desacoplamento ($s_{ijt} = 0$), desde que o fluxo tenda a sair do tanque, e pelas restrições (43) e (48) que obrigam o acoplamento

novamente, por meio da necessidade de um valor positivo de $h_{ij,t}$ e o consequente valor positivo de $q_{ij,t}$, quando $(p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) \geq 0 \quad \forall i \in K$. Quando f_{jt} é igual a um, as equações (59) exigem que a pressão no tanque seja igual ao limite superior do mesmo. Por outro lado, quando f_{jt} igual a zero, as restrições (60) impõem que a variável de pressão auxiliar p'_{jt} seja igual p_{jt} . Finalmente, as restrições (61) definem as variáveis binárias e a não negatividade de fluxo.

3.2 RELAXAÇÃO LINEAR DA FORMULAÇÃO PNLM

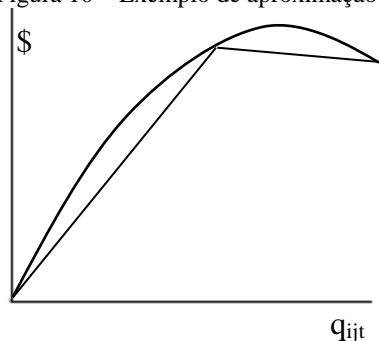
Esta formulação está baseada na formulação MINLP proposta na sessão anterior, mas considerando a linearização das não linearidades. A função objetivo (37) será linearizada pela aproximação de *piecewise* (Figura 10), enquanto que as curvas características de bomba (50) (Figura 11) e de Hazen-Williams (49) (Figura 12) serão linearizadas pela relaxação de *piecewise*.

A opção pela relaxação de *piecewise*, ao invés da aproximação, para as curvas características das bombas e para as curvas de *Hazen-Williams*, se deu por algumas razões. Em primeiro lugar, porque desta forma toda e qualquer solução para um dado problema original é solução para o mesmo problema relaxado, o que permite a utilização de pontos de partida já conhecidos. Segundo, porque se o problema relaxado não tiver solução, o problema original também não o terá (GEIßLER *et al.*, 2013), o que consiste em uma informação extra que não seria obtida ao utilizar a aproximação de *piecewise*, uma vez que se o problema aproximado não tem solução, nada se pode afirmar sobre o problema original.

Como a função objetivo é apenas consequência da operação do sistema, a utilização da aproximação de *piecewise* para a mesma não invalida as vantagens da utilização da relaxação para as curvas características de bomba e as curvas de H-W.

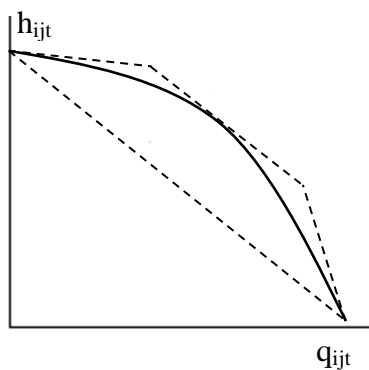
Finalmente, caso a função objetivo esteja subestimada pela aproximação linear, o que usualmente ocorre, pode-se afirmar que o limite inferior da função objetivo identificado por qualquer solucionador será válido para o problema original.

Figura 10 – Exemplo de aproximação de *piecewise* da função objetivo



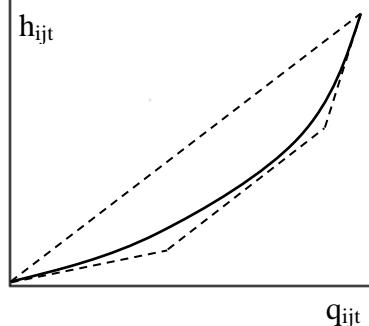
Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Figura 11 – Exemplo de relaxação de *piecewise* para uma curva característica de bomba



Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Figura 12 – Exemplo de relaxação de *piecewise* para a equação de HW



Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Para prosseguir com as linearizações é necessário definir o seguinte novo conjunto:

O: *Breakpoints*³ das curvas de bomba (37) e (50) e das curvas de Hazen-Williams (49);

G: Conjunto de todas as retas que impõe limites para as relaxações;

G^U: Conjunto das retas que impõe limites superiores para as relaxações;

G^L: Conjunto das retas que impõe limites inferiores para as relaxações.

Além dos seguintes parâmetros:

$Q_{o,ij}^{HW}$: pontos de fluxo (o) onde as curvas linearizadas terão, necessariamente, os mesmos valores de pressão da equação original de H-W, para a tubulação (i,j).

$H_{o,ij}^{HW} (Q_{o,ij}^{HW})$: pontos de pressão correspondente de valor de $Q_{o,ij}^{HW}$, onde:

$$H_{o,ij}^{HW} = \frac{10,64L_{ij} (Q_{o,ij}^{HW})^{1,852} / 3600}{k_{ij}^{1,852} (2R_{ij})^{4,87}}, \text{ se } Q_{o,ij}^{HW} \geq 0,$$

$$H_{o,ij}^{HW} = - \frac{10,64L_{ij} (-Q_{o,ij}^{HW})^{1,852} / 3600}{k_{ij}^{1,852} (2R_{ij})^{4,87}}, \text{ se } Q_{o,ij}^{HW} < 0$$

$Q_{o,ij}^P$: pontos de fluxo nos quais as curvas linearizadas terão, necessariamente, os mesmos valores de pressão das curvas características originais das bombas e os mesmos valores de custo da função objetivo original.

$H_{o,ij}^P (Q_{o,ij}^P)$: pressão no ponto $Q_{o,ij}^P$ da curva característica original da bomba P.

$Z_{o,ij}^P (Q_{o,ij}^P)$: custo da bomba P, no ponto de fluxo $Q_{o,ij}^P$ da curva original de custo, onde:

³ Pontos onde a aproximação ou relaxação de *piecewise* coincide necessariamente com a curva original.

$$Z_{o,ij}^P = \frac{\gamma C_{ijt}^C \Delta_T}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{ij}} H_{o,ij}^P Q_{o,ij}^P \quad (62)$$

$W_{o,ij}^P(Q_{o,ij}^P)$: kW consumido pela bomba P, no ponto de fluxo $Q_{o,ij}^P$, onde:

$$W_{o,ij}^P(Q_{o,ij}^P) = \frac{\gamma \Delta_T}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{ij}} H_{o,ij}^P Q_{o,ij}^P \Leftrightarrow \frac{Z_{o,ij}^P}{C_{ijt}^C} \quad (63)$$

As seguintes variáveis também precisam ser definidas:

$\lambda_{o,ij,t}$: Variável necessária para a aproximação de *piecewise* da função objetivo

$b_{o,ij,t} = 1$ se o *piecewise* está ativo, na tubulação (i,j), no período t;

0 caso contrário.

Para realizar a aproximação *piecewise* da função objetivo, foi utilizado o método de combinação convexa (DANTZIG, 1960), que se baseia no princípio de que é possível calcular uma função em um determinado ponto pela combinação convexa de dois nós vizinhos. Assim, a função objetivo (37) e as inequações (38), (39), (40) e (41) devem ser substituídas pelas restrições de (64) a (72).

$$\min \sum_t \sum_{ij \in P} \sum_o \lambda_{o,ij,t} Z_{o,ij,t}^P + \quad (64)$$

$$\left(\sum_{(i,j) \in P^A} a_{ij}^{FP} C_{ij}^{DaFP} + \sum_{(i,j) \in P^A} a_{ij}^P C_{ij}^{DaP} + \sum_{(i,j) \in P^V} v_{ij} C_{ij}^{DV} + \sum_{(i,j) \in P^C} c_{ij} C_{ij}^{DC} \right) / M$$

$$q_{ij,t} = \sum_o \lambda_{o,ij,t} Q_{o,ij}^P \quad \forall (i,j) \in P, \forall t \in T \quad (65)$$

$$\sum_o \lambda_{o,ij,t} W_{o,ij}^P \leq a_{ij}^P \quad \forall (i,j) \in P^A, t \in T^P \quad (66)$$

$$\sum_o \lambda_{o,ij,t} W_{o,ij}^P \leq a_{ij}^{FP} \quad \forall (i,j) \in P^A, t \in T / T^P \quad (67)$$

$$\sum_o \lambda_{o,ij,t} W_{o,ij}^P \leq v_{ij} \quad \forall (i, j) \in P^V, t \in T \quad (68)$$

$$\sum_o \lambda_{o,ij,t} W_{o,ij}^P \leq c_{ij} \quad \forall (i, j) \in P^C, t \in T \quad (69)$$

$$\sum_o \lambda_{o,ij,t} = 1 \quad \forall (i, j) \in P, \forall t \in T \quad (70)$$

$$\lambda_{o,ij,t} \leq b_{o-1,ij,t} + b_{o,ij,t} \quad \forall (i, j) \in P, o = 1, \dots, O-1, \forall t \in T \quad (71)$$

$$\lambda_{o,ij,t} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in P, o = 1, \dots, O-1, \forall t \in T \quad (72)$$

As equações de Hazen-Williams (49) e as curvas características de bomba (fluxo X pressão) (50) foram relaxadas e cada parte foi limitada por quatro retas, as quais formaram um envelope para a função original (Figura 12 e Figura 11), sendo que cada envelope é ativado por uma variável binária correspondente. Assim, essas restrições devem ser alteradas por desigualdades com formato genérico mostrado nas equações (73) e (74),

$$b_{o,ij,t} (A_{goij} q_{ijt} + B_{goij}) \geq b_{o,ij,t} h_{ijt} \quad \forall (i, j) \in N, o = 1, \dots, O-1, G \in G^U, \forall t \in T \quad (73)$$

$$b_{o,ij,t} (A_{goij} q_{ijt} + B_{goij}) \leq b_{o,ij,t} h_{ijt} \quad \forall (i, j) \in N, o = 1, \dots, O-1, G \in G^L, \forall t \in T \quad (74)$$

onde A_{goij} e B_{goij} são os coeficientes de retas que limitam os valores das curvas originais. As desigualdades (46) e (47) foram linearizadas pelo método de linearização do produto de um binário e uma variável contínua (BISSCHOP, 2006; COELHO, 2016), descrito com mais detalhes no referencial teórico deste trabalho. O mesmo método foi utilizado para linearizar as restrições (59) e (60). Julgou-se dispensável o detalhamento da aplicação deste método de linearização para este contexto específico, tendo em vista que o caso geral apresentado no referencial teórico bem representa qualquer caso específico.

É preciso ainda assegurar que ao menos um dos envelopes de cada tubulação seja ativado (75):

$$\sum_{o=0}^{O-1} b_{oijt} = 1 \quad \forall (i, j) \in N, \forall t \in T \quad (75)$$

E que as restrições de conservação de energia (45), sejam substituídas por (76):

$$(p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) - h_{ij,t} = 0 \quad \forall (i, j) \in N / (P \cup V \cup (\forall i \in K)), t \in T \quad (76)$$

Ressalta-se ainda que, uma vez que as equações (49) são linearizadas, $h_{ij,t}$ pode assumir valores positivos e negativos. As equações (51) não são mais necessárias, uma vez que as funções de eficiência estão embutidas na função objetivo e finalmente, as equações (61) devem passar a permitir fluxos negativos.

3.3 SIMPLIFICAÇÕES

Com o intuito de acelerar a convergência da busca por soluções por parte dos solucionadores, nesta sessão serão apresentadas simplificações aplicáveis à modelagem dos SAA.

3.3.1 Arcos com fluxo notável

Entre tanques e extremidades de um SAA, os arcos sem religação entre si ou com outras partes da rede, podem ter o seu fluxo pré-determinado de acordo com o consumo dos nós do trecho. Esta simplificação, quando válida, elimina as variáveis de fluxo q_{ijt} dos arcos em questão, reduzindo a complexidade do problema.

A Figura 13 mostra um exemplo hipotético, onde existem fluxos predefinidos. Neste caso, pode-se predefinir o fluxo dos arcos (6,4), (6,5), (7,6) e (8,7). Definindo Q_{ijt}^{Pre} como o fluxo predefinido no arco (i, j) no período t , poder-se-iam definir os valores de Q_{ijt}^{Pre} para o exemplo explicitado, como:

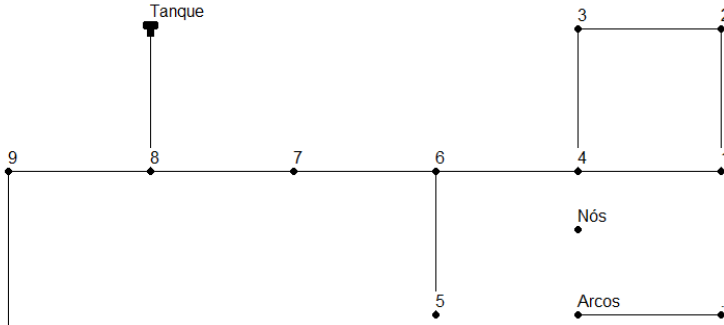
$$Q_{6,4,t}^{Pre} = D_{4,t} + D_{3,t} + D_{2,t} + D_{1,t} \quad (77)$$

$$Q_{6,5,t}^{Pre} = D_{5,t} \quad (78)$$

$$Q_{7,6,t}^{Pre} = D_{6,t} + Q_{6,5,t}^{Pre} + Q_{6,4,t}^{Pre} \quad (79)$$

$$Q_{8,7,t}^{Pre} = D_{7,t} + Q_{7,6,t}^{Pre} \quad (80)$$

Figura 13 – Exemplo de rede contendo arcos com fluxo notável



Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Ressalta-se ainda que os fluxos nos arcos (1,2), (2,3), (3,4) e (4,1) poderiam também ter seus fluxos predeterminados, mediante a resolução de um sistema de equações não lineares de fácil resolução por métodos numéricos. Considera-se que estes sejam, de fato, arcos com fluxo notável, uma vez que seus fluxos só dependem da demanda dos nós que os formam, independentemente, portanto, do horário de funcionamento das bombas e de qualquer outra forma de operação do sistema.

3.3.2 Arcos com perda de carga desprezível

Em alguns casos, quando se sabe que a perda de carga máxima em uma dada tubulação pode ser desprezada, pode-se simplificar as equações (76) e (47) tornando-as como (81) e (82) respectivamente:

$$(p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j) = 0 \quad \forall (i, j) \in N / (P \cup V \cup (\forall i \in K)) \quad (81)$$

$$s_{ij,t} ((p_{i,t} + E_i) - (p_{j,t} + E_j)) = 0 \quad \forall (i, j) \in (V \cup (\forall i \in K)), \forall t \in T \quad (82)$$

3.3.3 Inequações válidas

É sabido que inequações válidas ou planos de corte, aceleram a resolução de modelos PLIM (CORNUÉJOLS, 2008; MARCHAND *et al.*, 2002). Assim, nesta sessão serão definidos inequações válidas visando melhorar o desempenho dos solucionadores de PLIM.

3.3.3.1 Cortes de limitante inferior da função objetivo

Dado que o volume de água final dos tanques deve ser necessariamente maior ou igual ao volume inicial, pode-se estipular um valor mínimo de intervalos de tempo que as bombas conectadas a fontes de água devem estar ligadas. O número de intervalos de tempo em que essas bombas devem estar ligadas no intervalo de t a T deve ser suficiente para abastecer toda a demanda do sistema a partir de t até T , somado com a diferença entre o volume inicial de água nos tanques e o volume no tempo t . Para impor essa condição, é necessário definir um novo conjunto:

P_r : Conjunto de bombas que extraem água de fontes

Sendo p_{kt} o nível de água no tanque k , no instante t , pode-se então definir a seguinte inequação válida:

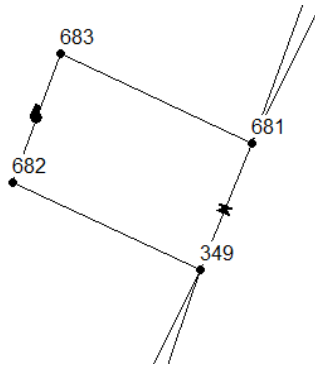
$$\sum_{k \in K} A_k (p_{k,1} - p_{k,t}) + \sum_t D_{i,t} \leq \sum_{(i,j) \in P_r} \sum_t s_{i,j,t} Q_{ij} \quad \forall t \in T \quad (83)$$

3.3.3.2 Cortes de válvulas e bombas em paralelo

É comum existirem válvulas em paralelo com bombas do tipo *booster*, a fim de que se tenha a opção de ligá-las ou desligá-las, mantendo o fluxo e sem ciclos. Este caso é exemplificado na Figura 14 e, desde que o ganho de pressão proporcionado pela bomba seja sempre maior que as perdas de carga nos arcos que a ligam à válvula (no exemplo: 349-682 e 683-681), o fluxo nunca ocorrerá por meio de ambas, e é possível, portanto, estabelecer a desigualdade (84) para o

exemplo, onde os índices numéricos representam os números dos nós indicados na Figura.

Figura 14 – Exemplo de rede com bomba e válvula em paralelo



Fonte: Elaboração do autor, 2016.

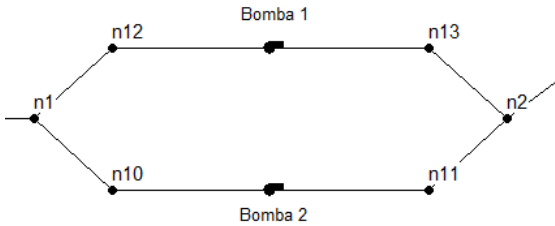
$$s_{682,683,t} + s_{349,681,t} \leq 1 \quad (84)$$

3.3.4 Simetrias

Quando existem bombas idênticas em paralelo, o número de estados possíveis se reduzem, uma vez que alguns deles são equivalentes. Quando duas bombas idênticas estão em paralelo, por exemplo, o número de combinações é reduzido de quatro para três possibilidades em cada período. A Figura 15 mostra um exemplo de rede apresentada por Van Zyl *et al.* (2004), para a qual é possível restringir as combinações equivalentes pela equação (85), a qual elimina a possibilidade de somente “Bomba 2” estar ligada.

$$s_{n10,n11,t} \leq s_{n12,n13,t} \quad \forall t \in T \quad (85)$$

Figura 15 – Exemplo de rede com bombas idênticas em paralelo



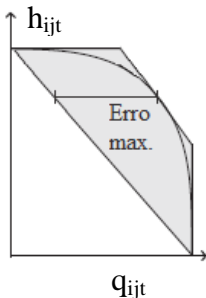
Fonte: Van Zyl *et al.* (2004)

3.4 DEFINIÇÃO DE *BREAKPOINTS*

Dado o conjunto de retas estabelecidas pela relaxação de *piecewise*, correspondentes a uma parte de uma dada curva de q_{ijt} por h_{ijt} , é possível definir: a) para cada ponto q_{ijt} a distância máxima em h_{ijt} (verticalmente), entre a curva original e as retas que a limitam; b) para cada ponto h_{ijt} a distância máxima em q_{ijt} (horizontalmente), entre a curva original e as retas que a limitam.

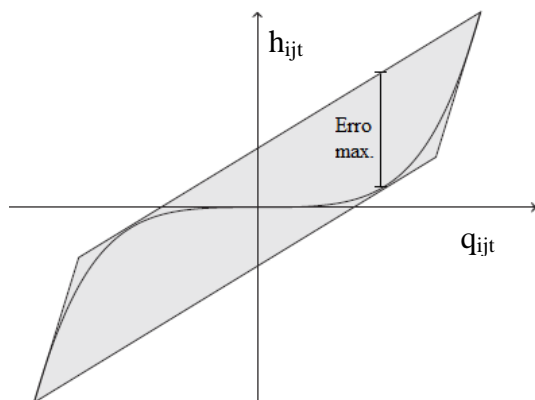
Os erros das curvas de bomba serão arbitrariamente definidos em termos de q_{ijt} (horizontalmente) enquanto que os erros das curvas de H-W serão definidos em termos de h_{ijt} . A Figura 16 e a Figura 17 demonstram a forma como se convencionaram os erros para cada tipo de curva.

Figura 16 – Exemplo de erro máximo de uma curva característica de bomba



Fonte: Elaboração do autor (2016)

Figura 17 – Exemplo de erro máximo de uma curva de H-W

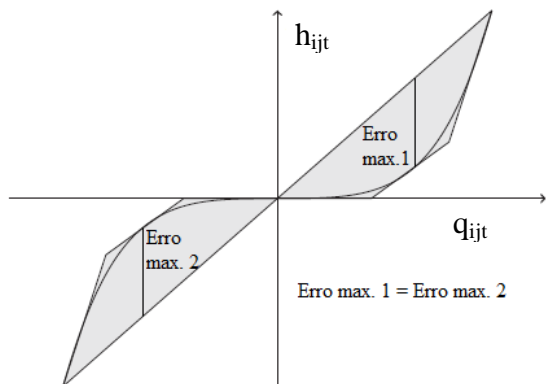


Fonte: Elaboração do autor (2016)

Quando só há uma única região linearizada, como a do exemplo das duas Figuras anteriores, os *breakpoints* são simplesmente os fluxos mínimos e máximos.

Ocorre que quando existem mais que dois *breakpoints*, estes terão que ser posicionados entre os valores de fluxo mínimo e máximo, e o posicionamento deles deverá ser feito de tal modo que cada região tenha um mesmo erro máximo, de forma a bem utilizar as variáveis binárias. A Figura 18 mostra um exemplo de uma curva de H-W com 3 *breakpoints*, na qual o intermediário deles está posicionado no ponto que assegura que o erro máximo de cada região seja o mesmo.

Figura 18 – Exemplo de erro máximo de uma curva de HW com duas partes



Fonte: Elaboração do autor (2016)

3.5 ESTRATÉGIA PARA APLICAÇÃO DO MODELO

Uma vez definidas as formulações relacionadas ao modelo proposto, é necessário estabelecer a forma como este irá conduzir as soluções para o problema. A Figura 19 resume o método desde a definição do erro máximo de cada tubulação devido à linearização, até a obtenção de soluções factíveis por meio do EPANET. O detalhamento das etapas será feito na sequência.

A primeira etapa consiste na definição do erro máximo desejado em fluxo para as bombas e em altura para as tubulações sem bombas. A partir dessa definição é possível determinar o número de *breakpoints* para cada tubulação e para cada curva característica de bomba, de modo que nenhum erro ultrapasse o valor máximo predefinido. A escolha do número de *breakpoints* define a quantidade de variáveis binárias e, consequentemente, a complexidade do problema de PLIM.

Caso a otimização do modelo de PLIM resultante seja inviável, logicamente, também não haverá solução para o problema original, conforme o princípio da relaxação de *piecewise* discutido no referencial teórico. No caso de o solucionador encontrar solução, esta será testada no simulador EPANET, de modo a avaliar sua consistência. Se a solução em teste no simulador atender todas as restrições e apresentar um custo com uma diferença para a solução do modelo matemático dentro de um percentual predefinido, finaliza-se o procedimento passando a considerar o resultado obtido com o simulador como o de referência.

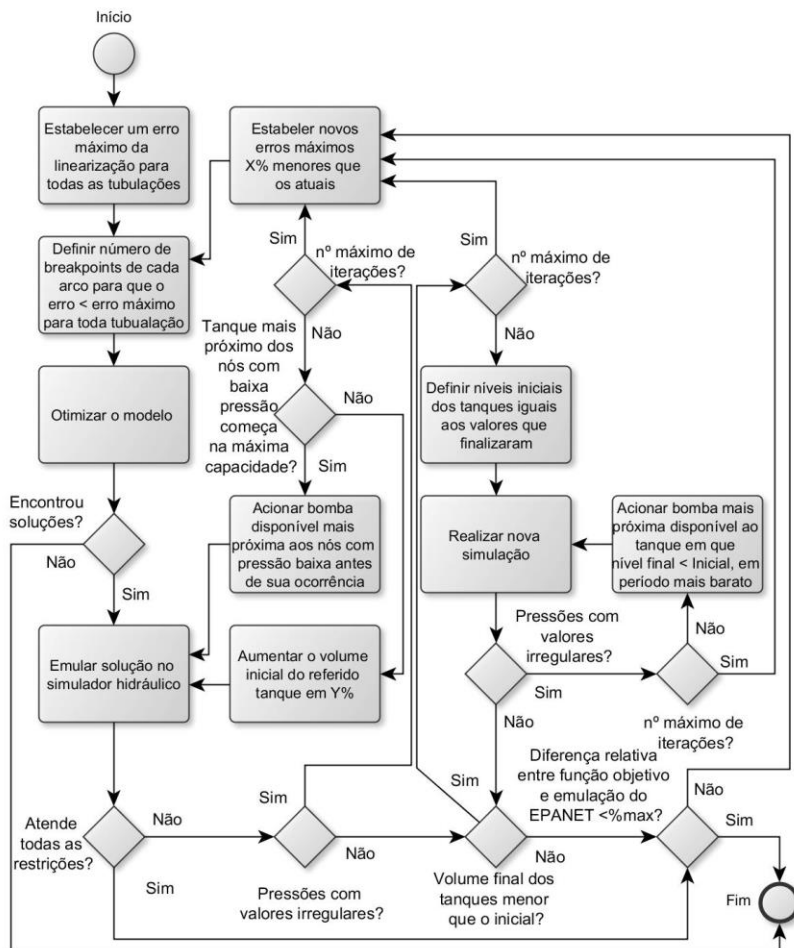
Caso a solução não atenda todas as restrições de viabilidade ela então passará por um procedimento que visará torná-la factível. A primeira verificação se dá nos valores de pressão, os quais não podem ser menores que 10 *m.c.a.* para nenhum dos nós com demanda. A ocorrência de nós com demanda e pressão menor que zero também indica a inviabilidade da solução, pois ainda que em determinado sistema se permita pressões abaixo de 10 *m.c.a.*, pressões abaixo de zero indicam que não há como suprir qualquer fluxo naquele ponto.

Com o intuito de ajustar os valores de pressão, o procedimento busca promover primeiramente uma alteração nos volumes iniciais dos reservatórios e, caso não se tenha resultados viáveis, exige novos acionamentos das bombas próximas aos referidos nós, em algum instante anterior ao instante da ocorrência das pressões irregulares, dando preferência para os horários mais baratos. Caso nenhum desses procedimentos gere resultados após um número de iterações, reestabelece-se novos erros máximos para a linearização, menores em X% em relação aos erros definidos na iteração anterior e inicia-se todo o procedimento novamente.

Após a verificação de pressão, observa-se se os volumes finais de água nos reservatórios estão menores que os iniciais. Caso estejam maiores e a solução apresente um custo com uma diferença para a solução do modelo matemático dentro de um percentual predefinido como aceitável, finaliza-se o procedimento e guarda-se a solução do simulador. Caso estejam menores, um procedimento é executado para buscar viabilizar a solução. Primeiramente, redefine-se o volume inicial de todos os tanques para os valores que os mesmos finalizaram a simulação. Caso o procedimento gere pressões irregulares novamente, deve-se acionar a bomba mais próxima do tanque com volume final menor que o inicial, em algum instante com disponibilidade e em que a tarifa seja a mais barata. Se o procedimento não convergir, deve-se reestabelecer novos erros máximos para cada tubulação, menores em X% em relação aos erros definidos na iteração anterior, e iniciar todo o procedimento novamente.

Por outro lado, se o procedimento viabilizar a solução e o custo resultante apresentar valor próximo o suficiente da solução proposta pelo modelo matemático, finaliza-se o procedimento e guarda-se a solução do simulador.

Figura 19 - Heurística da metodologia proposta



Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Definida a estratégia de viabilização de soluções, resta testar sua aplicabilidade. No próximo capítulo, serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo e estratégia propostos neste capítulo.

4 TESTE NUMÉRICO DO MODELO PROPOSTO

Conforme mencionado na introdução, este teste numérico será conduzido pelas etapas sugeridas por Hillier e Lieberman (2006), explicitadas na sequência.

4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Nesta etapa, a contextualização do sistema objeto de estudo será apresentada, seguida da definição do problema de pesquisa e sua delimitação.

Optou-se por utilizar como objeto de pesquisa uma parte do SAA da cidade de Florianópolis, a qual abastece aproximadamente 80.000 habitantes, com cerca de 600.000 m³ de água por mês. O sistema possui duas estações de tratamento (ETAs), sete estações de recalque (bombas) de água tratada (ERATs) e quatro reservatórios, resultando em uma modelagem com 630 nós e 654 arcos.

Ao confrontar as dificuldades de operação identificadas na literatura com as relatadas pelo corpo de gestores do SAA de Florianópolis, observaram-se similaridades, sobretudo em relação à complexidade da operação ao considerar diferentes formas de tarifação energética e em relação à dificuldade de prever a forma como o sistema irá operar ao alterar os horários de funcionamento das bombas.

Assim como observado nas referências, o SAA de Florianópolis também possui a energia elétrica como item de custo mais relevante, dentre os racionalizáveis. Dessa forma, o problema da prestadora de serviço escolhida consiste em determinar os horários em que suas bombas de recalque de água devem ser ligadas, respeitando as restrições de pressão determinadas pela norma, garantindo as demandas necessárias em cada nó, de modo a obter o menor custo de energia elétrica possível, levando em consideração as diferentes formas de tarifação energética.

4.2 COLETA DE DADOS

Uma vez definido o problema, partiu-se para a coleta de dados. Os dados coletados foram todos aqueles identificados como relevantes para aplicação do modelo, resultando na seguinte listagem: a) altitudes de todos os nós considerados; b) demandas dos nós; c) tarifas energéticas as quais as bombas estão sujeitas; d) comprimento entre nós;

e) diâmetros das tubulações; f) coeficiente de Hazen-Willians das tubulações; g) área dos tanques; h) volume máximo dos tanques; i) curva de eficiência por vazão das bombas; j) curva de pressão por vazão das bombas.

Anexado a este documento, encontra-se um CD com todos os dados coletados, em formato INP, o qual pode ser aberto por editores de texto ou pelo simulador hidráulico EPANET. A forma como os dados foram coletados será descrita a seguir, apresentados em sequência similar à do arquivo INP mencionado.

4.2.1 Dados de nós

4.2.1.1 Demandas

Para o levantamento das demanda dos nós da rede, inicialmente coletaram-se os dados de demanda média horária para cada mês, para cada bairro. Os dados foram preenchidos diretamente na folha de verificação apresentada na Tabela 2 e correspondem ao consumo total de todos os habitantes do bairro ao longo de um mês divididos pelo número de horas do respectivo mês, resultando em unidades de m^3/hora .

Tabela 2 – Folha de verificação para levantamento da demanda por bairro

	Demanda média horária [m^3/hora]				
	Jan	Fev	...	Nov	Dez
Bairro 1					
Bairro 2					
Bairro 3					

Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Com os dados de demanda média horária dos bairros, definiu-se o mês de junho de 2014 (mês de maior demanda média horária do ano) para realizar a otimização.

Em posse dos dados de demanda por bairro, ponderou-se a demanda horária média para cada um dos nós do respectivo bairro, por meio do fator de ponderação de demanda do nó, fornecidos pela prestadora do serviço. Esses fatores estão relacionados ao número de unidades consumidoras, as quais têm sua demanda alocada ao dado nó. Assim, pôde-se estabelecer a demanda horária média por nó e preencher

a folha de verificação indicada pela Tabela 3, a qual inclui também dados de altitude, os quais serão discutidos no tópico subsequente a este.

Tabela 3 – Folha de verificação para coleta de informação de nós

Id	Altitude	Bairro	Fator de ponderação de demanda do nó	Demanda média horária

Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Finalmente, restava ponderar a demanda horária média de cada nó ao longo do dia. Para isso, a empresa forneceu dados dos fatores de multiplicação que indicam a forma como a demanda ocorre ao longo de um dia, em média. Os valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de multiplicação de variação da demanda ao longo de um dia

De	Até	Fator	De	Até	Fator
00:00	01:00	0,65	12:00	13:00	1,08
01:00	02:00	0,52	13:00	14:00	0,73
02:00	03:00	0,52	14:00	15:00	0,83
03:00	04:00	0,52	15:00	16:00	0,8
04:00	05:00	0,61	16:00	17:00	1,34
05:00	06:00	0,72	17:00	18:00	1,4
06:00	07:00	0,73	18:00	19:00	1,51
07:00	08:00	0,8	19:00	20:00	1,64
08:00	09:00	0,94	20:00	21:00	1,64
09:00	10:00	1,08	21:00	22:00	1,58
10:00	11:00	1,15	22:00	23:00	1,3
11:00	12:00	1,18	23:00	00:00	0,73

Fonte: Gestores da prestadora, 2016.

Os dados de demanda média horária por nós, juntamente com os fatores de multiplicação ao longo do dia, foram utilizados diretamente no modelo de otimização por meio do produto de suas grandezas, resultando em uma demanda para cada hora do dia em m³/hora para cada um dos nós.

4.2.1.2 Altitudes

Para levantar as altitudes de todos os nós, utilizou-se a planta geral de instalação hidráulica, fornecida pelos gestores do SAA de Florianópolis, a qual continha os dados de altitude da rede. Os dados foram preenchidos e inseridos na folha de verificação indicada pela Tabela 3.

4.2.2 Dados de reservatórios

4.2.2.1 Área e volume máximo dos reservatórios

Para levantamento dos dados relativos aos tanques foi utilizada a folha de verificação mostrada na Tabela 5, na qual, além dos dados de área e volume máximo, foram coletados dados de altitude da base dos reservatórios e definidos nomes para identificá-los.

Tabela 5 – Folha de verificação para levantamento de dados sobre os reservatórios

Id Reservatórios	Altitude	Área	Volume máximo

Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Todos os dados relativos aos reservatórios foram levantados diretamente da planta geral de instalação hidráulica do SAA.

4.2.3 Dados de arcos

4.2.3.1 Comprimento, diâmetro e coeficiente de H-W das tubulações

Utilizou-se a planta geral de instalação hidráulica para levantar os dados de comprimento, diâmetro e coeficiente de Hazen-Williams das tubulações que ligam os nós uns aos outros. A definição de qual nó é o inicial e qual é o final é arbitrária. Os dados foram preenchidos diretamente na folha de verificação indicada na Tabela 6.

Tabela 6 – Folha de verificação para coleta de informação de arcos

Id Arco	Nó inicial	Nó final	Coefficiente de H-W	Comprimento	Diâmetro

Fonte: Elaboração do autor, 2016.

4.2.4 Dados de bombas

4.2.4.1 Tarifas, curvas de eficiência e pressão em função da vazão

As tarifas energéticas praticadas pela fornecedora de energia elétrica foram consultadas e levantadas diretamente das contas de energia do SAA. As curvas de eficiência por vazão e pressão por vazão foram coletadas nos sites dos fabricantes das bombas. Os modelos de cada bomba do SAA Florianópolis foram levantados em visitas a campo e utilizou-se a folha de verificação mostrada na Tabela 7 para facilitar a coleta de dados.

Tabela 7 – Folha de verificação para levantamento de dados de bomba

	Marca / Modelo	Forma de tarifação
Bomba 1		
Bomba 2		

Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Além do modelo, observou-se ainda sob qual forma de tarifação cada bomba estava sujeita.

4.3 ANÁLISE DE DADOS

Em posse de todos os dados levantados foi possível criar um modelo hidráulico no software EPANET e realizar a emulação da operação do mês de junho de 2014 e avaliar assim, a consistência dos dados coletados e corrigir eventuais erros.

A Figura 21 mostra o modelo hidráulico criado, ao passo que os resultados financeiros da simulação da operação do mês de junho de

2014 encontram-se na Figura 20. O custo diário de consumo foi de R\$ 2.068,93, o que resultou em R\$ 62.067,90 de consumo no mês de junho de 2014. Como o software não emula a possibilidade de diferentes valores de demanda para diferentes horários, o que seria necessário para a Tarifação Horossazonal Azul, os valores de demanda foram calculados à parte. Os custos totais de demanda resultaram em R\$ 13.148,40, totalizando um custo total simulado de R\$ 75.216,30 para o mês de junho de 2014, contra um valor real obtido como resultado pela prestadora do serviço de R\$ 74.914,90. A Tabela 8 resume os resultados financeiros simulados e reais para o referido mês.

Figura 20 – Relatório de energia da simulação da operação da prestadora do serviço de junho de 2014

Bomba	Porcentagem Utilização	Rendimento Médio	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia
B1	100.00	70.40	0.30	269.33	274.88	1555.54
B2	6.42	80.00	0.33	59.82	62.24	33.24
B3	91.67	80.00	0.12	34.32	35.21	180.66
B4	100.00	63.70	0.27	24.58	33.24	207.41
B5	45.83	80.00	0.13	12.01	13.20	46.43
B6	25.00	80.00	0.15	8.65	8.73	12.41
B2b	6.42	80.00	0.33	59.82	62.24	33.24
Custo Total						2068.93

Fonte: EPANET

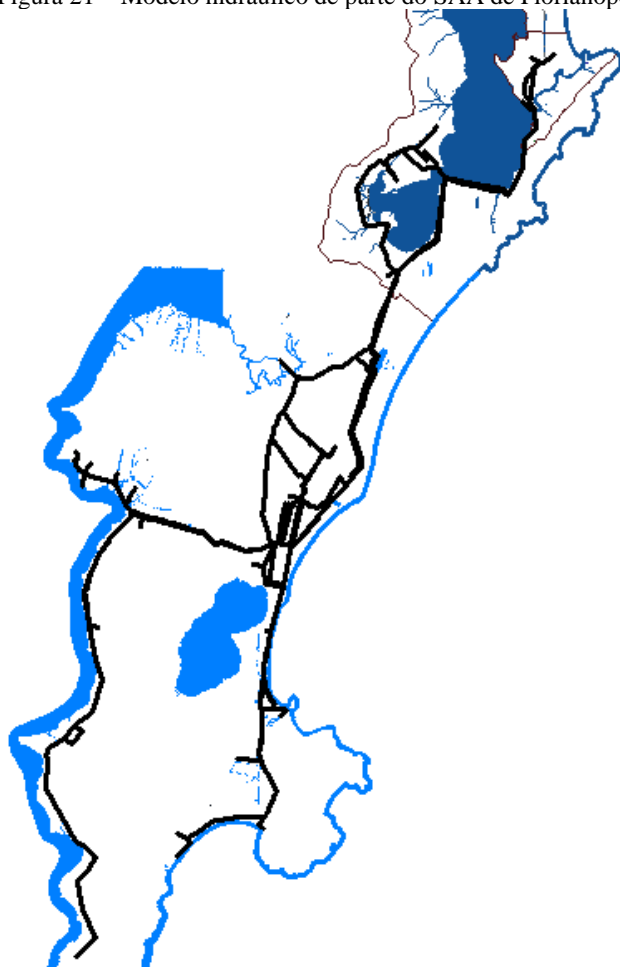
Tabela 8 – Comparativo de custos reais e simulados da operação da prestadora

	Simulação	Real
Consumo	R\$ 62.067,90	R\$ 61.644,29
Demanda	R\$ 13.148,4	R\$ 13.270,61
Total mensal	R\$ 75.216,3	R\$ 74.914,90
Total diário	R\$ 2.507,21	R\$ 2.497,16

Fonte: Elaboração do autor, 2016.

Observa-se uma pequena diferença de 0,4% entre os custos reais e simulados, o que demonstra que o modelo hidráulico e, portanto, os dados levantados, estão consistentes com a realidade. O custo de R\$ 75.216,30 será utilizado como referência a partir de então, servindo para comparativos para eventuais ganhos a serem obtidos com a otimização da operação do sistema.

Figura 21 – Modelo hidráulico de parte do SAA de Florianópolis



Fonte: Elaboração do autor (2016).

4.4 FORMULAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

As formulações utilizadas para solucionar o problema, apresentadas no Capítulo 3 deste trabalho, foram elaboradas no ambiente do software GAMS, o qual será responsável pela interação

entre o modelo descrito e os solucionadores ou *solvers* presentes em seu ambiente.

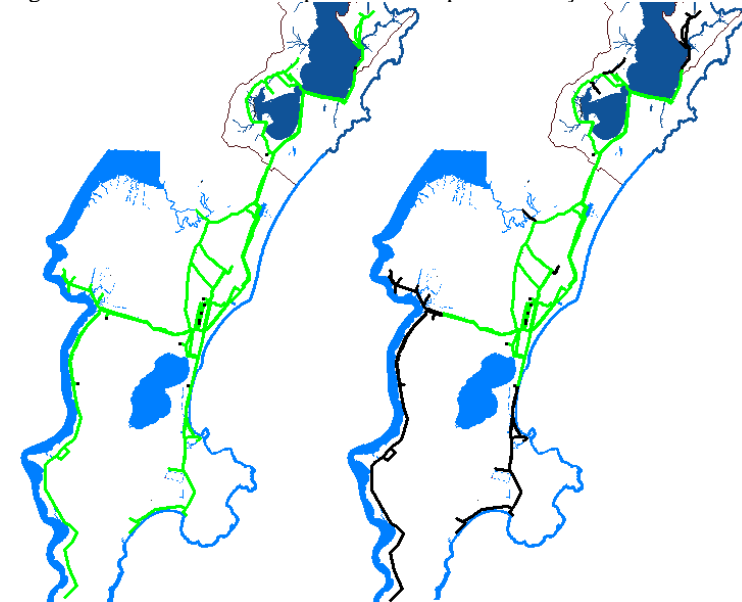
As adaptações e linearizações lá mencionadas foram direcionadas a partir da consulta aos gestores do sistema objeto de estudo, de modo a cobrir aspectos importantes não considerados no modelo de Ghaddar *et al.* (2015), o qual foi apresentado no referencial teórico deste trabalho.

Tendo em vista que os pacotes comerciais de otimização não têm sido capazes de solucionar problemas da operação de SAA, nesta sessão serão explicitadas as simplificações utilizadas para resolução do problema em questão, no sentido de contribuir para a redução do tempo computacional necessário para a convergência das soluções.

4.4.1 Arcos com fluxo notável

Aplicando o procedimento descrito no Capítulo 3, verificou-se que 233 arcos poderiam ter seu fluxo predefinido, reduzindo o número de variáveis de fluxo a serem determinadas. Na Figura 22, um panorama do SAA de Florianópolis antes e após a definição dos arcos com fluxo notável (em cor preta).

Figura 22 – SAA de Florianópolis antes e após a definição dos arcos notáveis



Fonte: Elaboração do autor

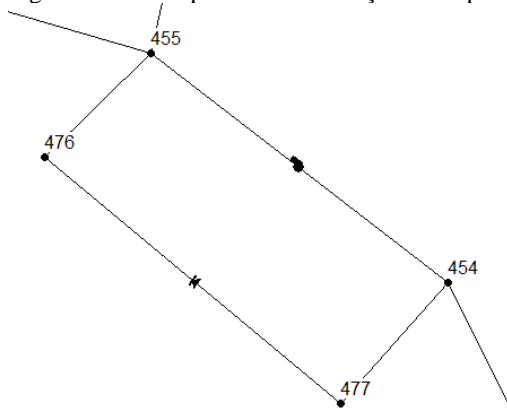
De 654 arcos cujas variáveis de fluxo teriam que ser determinadas, restaram 421, o que representou uma redução de aproximadamente 35% no número de arcos e variáveis do problema.

4.4.2 Arcos com perda de carga desprezível

Para definir os arcos (tubulações) com perda de carga desprezível foram escolhidos aqueles arcos em que seu fluxo máximo não fosse suficiente para gerar uma perda de carga de 0,5 cm.

Considerando este critério, 13 novos arcos tiveram sua perda de carga previamente atribuída a zero, conforme as equações (81) e (82). A Figura 23 mostra um exemplo de uma configuração de bomba em paralelo com válvula, de três tubulações do SAA de Florianópolis com perda de carga desprezível, devido ao pequeno comprimento e/ou alto valor de diâmetro.

Figura 23 – Exemplo de três tubulações com perda de carga desprezível



Fonte: Elaboração do autor (2016).

Na sequência serão abordadas as simplificações relativas aos cortes e quebra de simetrias.

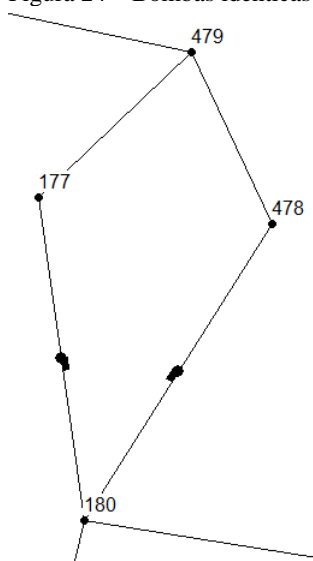
4.4.3 Cortes e quebra de simetrias

Para modelar as inequações válidas relativas aos cortes de limitante inferior da função objetivo foi necessário definir as bombas que extraem água de fontes, que para a rede Florianópolis eram três. Assim, pode-se incluir as inequações válidas (83).

Já para os cortes de válvulas em paralelo com bombas, foi necessário incluir inequações válidas para quatro casos presentes no sistema, tais como o da Figura 23.

As simetrias se fizeram presentes em somente um caso, mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Bombas idênticas em paralelo do SAA de Florianópolis



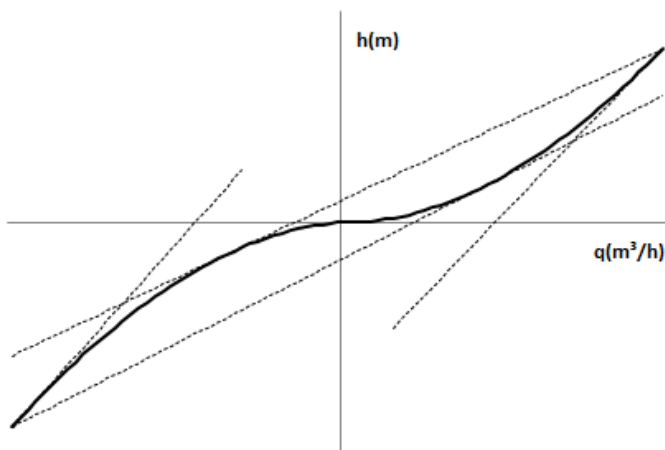
Fonte: Elaboração do autor (2016)

Nesta pesquisa, o aprimoramento e testes dos modelos se deram durante todo o processo de modelagem. Tal procedimento teve como instrumento, entrevistas e constatações das correlações entre o modelo teórico e o contexto prático, culminando na formulação por PNLIM adaptada do modelo de Ghaddar *et al.* (2015), desenvolvida no Capítulo 3.

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

O procedimento utilizado para a obtenção de soluções está baseado nas formulações e na estratégia proposta no Capítulo 3. Inicialmente se arbitrou um erro em fluxo de $20\text{m}^3/\text{h}$ para as bombas, e em altura de 10m para as tubulações sem bombas. O erro das tubulações simples foi escolhido levando em conta que para este erro máximo, poderia se trabalhar sem variáveis binárias para as tubulações sujeitas às equações de HW, as quais são mais numerosas que a quantidade de bombas. O erro máximo médio das tubulações sem bomba ficou em $1,24\text{m}$. Para obter um erro máximo de $20\text{ m}^3/\text{h}$ para qualquer bomba foram necessárias 2 partes de *piecewise*. A Figura 25 mostra como foram construídas as relaxações das equações de H-W para o SAA de Florianópolis.

Figura 25 – Relaxações utilizadas para as equações de H-W do SAA de Florianópolis



Fonte: Elaboração do autor (2016)

As formulações foram implementadas no ambiente do software GAMS, o qual foi responsável por fazer a interação entre modelo e solucionador. Para acelerar a convergência de soluções foi inserida no modelo uma solução inicial viável.

O primeiro resultado para o modelo de PLIM foi obtido utilizando o solucionador IBM ILOG CPLEX *Optimizer* disponível por meio do serviço gratuito do *NEOS Server* (CZYZYK, 1998; DOLAN, 2001; GROPP, W., 1997). Após 8 horas de execução, tempo máximo

permitido pelo servidor, obteve-se um resultado de R\$ 1709,43, para o custo diário de operação, com um limitante inferior de R\$1367,30 (*Gap* de 20,01%). A solução obtida é apresentada na Tabela 9, onde a linha superior demonstra os nós de ligação das bombas e as linhas subsequentes, os horários onde cada bomba está ativa (quando igual a um).

Em posse da solução do modelo matemático, foi preciso então, validar a solução obtida por meio do simulador hidráulico EPANET. Ao emular a solução, em menos de um segundo, obteve-se um novo valor de custo de R\$ 1.905,78. A Tabela 10 detalha a solução.

Tabela 9 – Solução do modelo obtida pelo *NEOS Server*

	S478,180	S177,180	S685,686	S42,41	S682,683	S454,455	S44,43		S478,180	S177,180	S685,686	S42,41	S682,683	S454,455	S44,43
00:00-01:00	1	0	1	1	1	0	0	12:00-13:00	1	0	1	1	1	0	0
01:00-02:00	1	0	0	1	1	0	0	13:00-14:00	1	0	0	1	1	0	0
02:00-03:00	1	0	0	0	0	0	0	14:00-15:00	1	1	0	0	1	0	0
03:00-04:00	1	0	1	1	1	0	0	15:00-16:00	1	0	1	0	0	0	0
04:00-05:00	1	0	1	1	1	0	0	16:00-17:00	1	0	0	1	0	1	0
05:00-06:00	1	0	0	0	0	0	0	17:00-18:00	1	0	0	0	0	1	0
06:00-07:00	0	0	0	1	1	0	0	18:00-19:00	1	0	0	0	1	1	1
07:00-08:00	1	1	1	0	1	0	0	19:00-20:00	1	1	0	0	1	1	1
08:00-09:00	1	0	0	1	1	0	0	20:00-21:00	1	0	0	1	0	1	1
09:00-10:00	1	1	0	0	1	0	0	21:00-22:00	1	0	1	1	0	1	1
10:00-11:00	1	0	0	1	0	0	0	22:00-23:00	1	1	1	1	1	1	0
11:00-12:00	1	0	0	1	0	0	0	23:00-24:00	1	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaboração do autor, 2016

Tabela 10 – Emulação da solução

Item de custo	Valor
Consumo	R\$1.730,26
Demanda	R\$175,52
TOTAL	R\$1.905,78

Fonte: Elaboração do autor, 2016

Seguindo os passos do procedimento proposto, é necessário avaliar se tal solução atende todas as restrições. Inicialmente, a restrição de pressões acima de 10 *m.c.a.* foi atendida, no entanto os volumes finais dos tanques ficaram menores que os iniciais, exigindo alterações na solução proposta. A primeira tentativa foi ajustar os níveis iniciais dos tanques para os mesmos valores com os quais terminaram, o que gerou pressões negativas em alguns nós. Acionou-se então as bombas mais próximas aos referidos nós, dando preferência para os horários com tarifação reduzida. Esse procedimento resultou em uma alteração da solução proposta em 11 intervalos de tempo e conduziu a uma solução viável. A Tabela 11 apresenta a solução alterada com as indicações de que mudanças foram realizadas (em cor de fundo preta).

Tabela 11 – Solução adaptada

	S478,180	S177,180	S685,686	S42,41	S682,683	S454,455	S44,43		S478,180	S177,180	S685,686	S42,41	S682,683	S454,455	S44,43
00:00-01:00	1	0	1	1	1	0	0	12:00-13:00	1	0	1	1	1	0	0
01:00-02:00	1	0	1	1	1	0	0	13:00-14:00	1	0	0	1	1	0	0
02:00-03:00	1	0	1	0	1	0	0	14:00-15:00	1	1	0	0	1	0	0
03:00-04:00	1	0	1	1	1	0	0	15:00-16:00	1	0	1	0	0	0	0
04:00-05:00	1	0	1	1	1	0	0	16:00-17:00	1	0	0	1	0	1	0
05:00-06:00	1	0	1	0	0	0	0	17:00-18:00	1	0	0	0	0	1	0
06:00-07:00	0	0	1	1	1	0	0	18:00-19:00	1	0	0	0	1	1	1
07:00-08:00	1	1	1	0	1	0	0	19:00-20:00	1	1	0	0	1	1	1
08:00-09:00	1	0	1	1	1	0	0	20:00-21:00	1	1	0	1	0	1	1
09:00-10:00	1	1	0	0	1	0	0	21:00-22:00	1	1	1	1	0	1	1
10:00-11:00	1	0	0	1	0	0	0	22:00-23:00	1	1	1	1	1	1	0
11:00-12:00	1	0	0	1	0	0	0	23:00-24:00	1	1	1	0	1	0	0

Fonte: Elaboração do autor, 2016

Conforme o esperado, as alterações conduziram a um resultado com custo maior que a solução antes das adaptações. O novo valor de custo ficou em R\$2.085,48, o que representa um aumento de aproximadamente 22% em relação à solução proposta pelo modelo matemático, o que foi considerado como aceitável para o caso em

questão. A Tabela 12 mostra um panorama das soluções obtidas até então, incluindo a solução adotada pela prestadora do serviço.

Tabela 12 – Panorama das soluções obtidas

	Modelo	Emulação do modelo no EPANET	Emulação no EPANET da solução adaptada	Solução da prestadora
Consumo (R\$)	1.550,03	1730,26	1906,57	2.068,93
Demanda (R\$)	159,4	175,52	178,91	438,28
Total (R\$)	1.709,43	(*)1.905,78	2.085,48	2.507,21
Limitante inferior (R\$)	R\$1.367,30			

*Solução inviável.

Fonte: Elaboração do autor, 2016

Observa-se que houve uma redução de 16,82% entre a solução utilizada pela empresa e a proposta pelo método, o que representaria um montante de R\$ 12.651,90 no mês de julho de 2014. Em relação ao limitante inferior do modelo de PLIM, o qual é válido para o problema original, a solução obtida após a heurística tem um *gap* de 34,44%, em que pese tal limitante ser provavelmente inviável, sobretudo pelo fato de existirem os erros relativos às linearizações. Um comparativo detalhado entre a solução proposta e a da prestadora é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparativo entre solução otimizada e da prestadora

	Solução proposta	Solução da empresa	Diferença absoluta	Diferença relativa
Consumo (R\$)	1906,57	2.068,93	162,36	7,84%
Demanda (R\$)	178,91	438,28	259,37	59,17%
Total (R\$)	2.085,48	2.507,21	421,73	16,82%
Total Mês (R\$)	62564,40	75.216,3	12.651,9	16,82%

Fonte: Elaboração do autor, 2016

Observa-se ainda que não somente o custo com energia foi menor, como também o próprio consumo energético. Para a solução otimizada, a quantidade de *kW* cedida ao sistema pelas bombas foi de 7481 contra 8995 da solução adotada pela prestadora, o que representa uma redução de 16,83%.

Percebe-se que a redução percentual que se obteve no consumo energético (16,83% em *kW*) foi maior que a redução de custos relativos ao consumo (7,84% em R\$), o que sugeriria que um ganho em consumo não representasse um ganho financeiro proporcional. No entanto ao considerar os ganhos totais em custo (16,82%), considerando também o ganho em demanda, o valor se aproxima da redução do consumo energético (16,83%). Tal fato não era esperado e acredita-se que não deva ser um padrão, uma vez que é possível supor casos em que os ganhos potenciais estejam somente no aproveitamento das diferenças de tarifas sem que se alterassem os consumos energéticos. Em outras palavras, é possível conceber um caso em que não haja ganho em *kW* mas haja ganho financeiro pelo aproveitamento de tarifas.

A redução da energia fornecida se deve também ao fato de a energia total perdida por arrasto nas tubulações ter sido menor na solução otimizada. O valor passou de 2958 *kW* perdidos por arrasto na solução da prestadora, para 2146 *kW* na solução otimizada. A Tabela 14 resume as diferenças de consumo energético nos dois cenários.

Tabela 14 – Comparativo energético entre solução otimizada e a da prestadora

	Otimizado (kW)	Empresa (kW)	Diferença absoluta (kW)	Diferença relativa
Energia fornecida (kW)	7481	8995	1514	16,83%
Perdas (kW)	2146	2958	812	27,45%
Perda relativa	28,69%	32,88%		

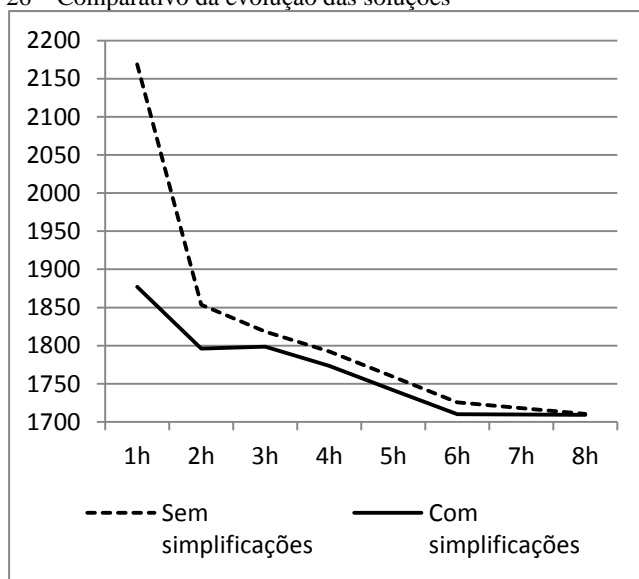
Fonte: Elaboração do autor, 2016

Deduz-se que a diferença entre a energia fornecida entre as soluções otimizada e da prestadora não decorre somente da redução das perdas. Da diferença de 1514 de energia fornecida, somente 812 (53,63%) são explicados pela redução de perdas por arrasto. Supõe-se que a energia restante foi poupada pela maior utilização das bombas mais eficientes do sistema e redução das bombas menos eficientes e talvez pelos volumes de operação dos reservatórios, pois se sabe que trabalhar com reservatórios em níveis diferentes altera a quantidade de energia dispendida pelas bombas.

Uma possível causa para a redução das perdas por arrasto está possivelmente no aumento da utilização das bombas mais centrais do sistema, uma vez que estas são mais próximas, em média, das demandas.

Com o intuito de verificar o efeito das inequações válidas e simetrias propostas na velocidade de convergência do solucionador ILOG CPLEX *Optimizer*, comparou-se o valor da função objetivo obtido a partir de modelos com e sem as simplificações propostas, ao longo das oito horas permitidas pelo *NEOS Server* (CZYZYK, 1998; DOLAN, 2001; GROPP, W., 1997). A evolução das soluções é mostrada na Figura 26.

Figura 26 – Comparativo da evolução das soluções



Fonte: Elaboração do autor (2016)

Observou-se um desempenho consideravelmente maior do modelo simplificado nas duas primeiras horas de teste. Até a primeira hora, a diferença de valores da função objetivo atingiu aproximadamente 300 unidades monetárias e cerca de 10 pontos percentuais em relação aos seus respectivos limitantes inferiores. Pode-se considerar que na primeira hora de testes o modelo simplificado estava uma hora adiantado em relação ao modelo sem as simplificações. Por outro lado, após esse tempo, embora o modelo simplificado sempre estivesse com a função objetivo menor, os valores se aproximaram entre si e se mantiveram próximos até o final das oito horas. Ainda assim, considera-se relevante os ganhos obtidos em tempo computacional para o modelo simplificado, uma vez que o resultado obtido nas primeiras

duas horas para o modelo com simplificações, alcançou uma diferença de apenas 5% aproximadamente, em relação ao valor obtido após 8 horas.

Diante dos resultados financeiros obtidos, pressupõe-se que a otimização da operação de SAA não só é capaz de reduzir o custo com energia, como também reduzir o próprio consumo energético, o que representa um benefício ambiental de sua utilização.

Os ganhos propostos obtidos nesta pesquisa são compatíveis aos de outras aplicações verificadas na literatura, como por exemplo, a da cidade de Valência, situada no leste da Espanha (MARTÍNEZ *et al.*, 2007), e em Haifa, norte de Israel (SALOMONS *et al.*, 2007), onde os ganhos financeiros propostos foram de 17,6% e 25%, respectivamente.

Não fez parte desta pesquisa, a análise de todos os riscos associados à implementação da solução proposta. No entanto, realizou-se uma simulação com as demandas superestimadas em 3% no *software* EPANET e, com apenas quatro novos acionamentos de bombas, obteve-se uma solução viável, com custo de R\$ 2.235,91, valor este ainda 10,8% menor que a solução adotada pela prestadora. Esta limitação poderá ser melhor explorada em trabalhos futuros, por meio de programação estocástica, por exemplo.

É válido mencionar que, ainda que fossem consideradas todas as aleatoriedades e riscos, os resultados obtidos não poderiam ser simplesmente aplicados na prática, indiscriminadamente. Como sugestão, indica-se que aspectos estratégicos e mais relevantes da solução proposta sejam identificados e aplicados, como uma direção geral a ser seguida.

Por fim, ressalta-se a importância da consideração da contratação de demandas energéticas no caso estudado, e o fato de poucos trabalhos da literatura considerarem tal característica.

4.6 VALIDAÇÃO

Nesta pesquisa a validação dos resultados foi promovida por meio da emulação da solução otimizada no *software* EPANET, descrita nas etapas anteriores. Também foram realizadas entrevistas com os gestores ao longo de todo o trabalho, inclusive nas fases de testes dos modelos.

Conforme mencionado, a confiabilidade do sistema na solução proposta não foi avaliada e tal fato foi uma limitação da pesquisa e seria requerido pelos gestores em uma implementação prática.

Uma vez validada e analisada a solução encontrada, cumpriu-se o objetivo inicialmente estabelecido pela presente pesquisa de se propor um plano de operações para parte do sistema de distribuição de água da cidade de Florianópolis.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa se propôs a encontrar um plano de operação para uma parte do sistema de abastecimento de água presente em Florianópolis, no sul do Brasil.

O método proposto foi capaz de apresentar solução para o problema e, embora não se tenha garantido otimalidade, obteve-se um ganho teórico em relação à solução adotada pela prestadora do serviço de 16,82%. Para auxiliar na convergência de soluções do modelo matemático foram utilizadas soluções iniciais sabidamente viáveis, o que permitiu que o modelo já iniciasse com uma boa solução. Além disso, todas as simplificações propostas reduzem o número de combinações de soluções factíveis, trazendo melhorias de desempenho, o que era esperado de acordo com a literatura sobre inequações válidas e cortes de simetrias. Apesar dos erros máximos e médios previamente conhecidos para as tubulações, a solução encontrada pelo modelo tornou-se válida com apenas 11 acionamentos a mais de bombas, o que aumentou em aproximadamente 22% os custos em relação à solução obtida pelo modelo matemático.

Além dos ganhos financeiros, houve redução da energia cedida ao sistema em 16,83% e uma redução de 27,45% das perdas de carga. Dos 1.514 kW economizados em energia cedida ao sistema, 812 kW podem ser explicados pela redução das perdas de carga, sendo que os outros 702 kW economizados supõe-se que foram devido a dois fatores. O primeiro provável fator, o qual se supõe ser o mais relevante, seria o fato de na solução proposta ter se aumentado a utilização das bombas mais eficientes do sistema e diminuído a utilização das bombas menos eficientes. Um segundo possível aspecto, seriam os diferentes pontos de trabalho dos reservatórios ao longo do dia, os quais têm influência na energia dispendida pelas bombas. Assim pressupõe-se que a otimização da operação de SAA não só pode trazer ganhos financeiros, como também pode trazer benefícios ambientais, os quais se deram em mesma proporção no caso estudado.

A redução das perdas por arrasto chamou atenção, pois parece que a solução proposta buscou utilizar as bombas mais centrais do sistema, que, além de mais eficientes, o que não impactaria nas perdas de carga ao longo do sistema, são mais próximas do centro geométrico do sistema. Tal fato remete novamente à analogia dos SAA com um sistema logístico, como o problema do posicionamento de um centro de distribuição, por exemplo.

Ressalta-se também a importância da consideração das demandas contratadas de energia no modelo proposto. Cerca de 60% do ganho financeiro se deu na redução da demanda a ser contratada. Esse aspecto tem sido pouco abordado na literatura e poucos foram os artigos do portfólio que fizeram tal consideração.

A partir dos resultados obtidos, consideram-se cumpridos os objetivos geral e específicos inicialmente estabelecidos pela presente pesquisa, de se propor um plano de operações para parte do sistema de distribuição de água da cidade de Florianópolis. A pesquisa também cumpriu cronologicamente os objetivos específicos na ordem em que foram expostos, apresentando os resultados inicialmente esperados ao longo dos capítulos 3 e 4.

Uma limitação da pesquisa foi a não consideração dos riscos e de variabilidades nos dados utilizados, já que todos os parâmetros foram dados como determinísticos. Tal fato não implica na não validade da solução proposta. Para reduzir esta limitação, realizou-se uma simulação com as demandas superestimadas em 3% no *software* EPANET, obtendo-se uma solução viável com custo de R\$ 2.235,91, valor este ainda 10,8% menor que a solução adotada pela prestadora.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se que se ampliem as inequações e outras simplificações válidas para o modelo, pois dessa forma é possível reduzir os erros das linearizações e manter o problema solucionável em tempo razoável, o que resultaria em propostas mais próximas da viabilidade já na solução do modelo matemático, sem a necessidade de muitos ajustes ou heurísticas.

Outra possível pesquisa futura implicaria na consideração de outros aspectos dos SAA além do financeiro, como por exemplo, questões de confiabilidade, qualidade da água e variabilidades nas demandas.

REFERÊNCIAS

2030 WRG (2030 WATER RESOURCES GROUP). **Charting our water future: Economic frameworks to inform decision-making**. [S. I.]. 2009.

ABREPRO. **Áreas e Sub-áreas de Engenharia de Produção**. Disponível em:
<<http://www.abepro.org.br/interna.asp?p=399&m=424&ss=1&c=362>>.
Acesso em: 01 fev. 2016.

ASE (ALLIANCE TO SAVE ENERGY). **Watergy: Taking Advantage of Untapped Energy and Water Efficiency Opportunities in Municipal Water Systems**. Washington, 2002

BABAEI, N.; TABESH, M.; NAZIF, S. Optimum reliable operation of water distribution networks by minimising energy cost and chlorine dosage. **Water SA**, v. 41, n. 1, p. 149-156, 2015. ISSN 03784738 (ISSN).

BAGIROV, A. M.; BARTON, A. F.; MALA-JETMAROVA, H.; AL NUAIMAT, A.; AHMED, S. T.; SULTANOVA, N.; YEARWOOD, J. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 57, n. 3-4, p. 873-886, 2013. ISSN 08957177 (ISSN).

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, 2002, p. 241-264.

BISSCHOP, Johannes. **AIMMS optimization modeling**. Lulu. com, 2006.

BŁASZCZYK, J.; MALINOWSKI, K.; ALLIDINA, A. Aggregated pumping station operation planning problem (APSOP) for large scale water transmission system. In: **International Workshop on Applied Parallel Computing**. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 260-269.

BRAGALLI, C.; D'AMBROSIO, C.; LEE, J.; LODI, A.; TOTH, P. On the optimal design of water distribution networks: A practical MINLP approach. **Optimization and Engineering**, v. 13, n. 2, p. 219-246, 2012. ISSN 13894420 (ISSN).

BUNN, S. Operating pumps to maximise efficiency. **Water**, v. 36, n. 4, p. 44-51, 2009. ISSN 03100367 (ISSN).

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. Efficiency achievement in water supply systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 59-84, 2014. ISSN 13640321 (ISSN).

COELHO, L. C. **Linearization of the product of two variables**. 2013. Disponível em: <<http://www.leandro-coelho.com/linearization-product-variables/>>. Acesso em: 1 mar. 2016.

COHEN, D.; SHAMIR, U.; SINAI, G. Optimal operation of multiquality water supply systems-III: the Q-C-H model. **Engineering Optimization**, v. 33, n. 1, p. 1-35, 2000. ISSN 0305215X (ISSN).

_____. Optimisation of complex water supply systems with water quality, hydraulic and treatment plant aspects. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 26, n. 4, p. 295-321, 2009. ISSN 10286608 (ISSN).

CORNUÉJOLS, G. Valid inequalities for mixed integer linear programs. **Mathematical Programming**, v. 112, n. 1, p. 3-44, 2008. ISSN 0025-5610.

COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. M. Use of hybrid genetic algorithms for optimized operation of water supply systems. **Engenharia Sanitaria E Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 187-196, Jun 2010. ISSN 1413-4152.

COSTA, L. H. M.; RAMOS, H. M.; DE CASTRO, M. A. H. Hybrid genetic algorithm in the optimization of energy costs in water supply networks. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 10, p. 315-326, 2010.

CZYZYK, J., MESNIER, M. P., AND MORÉ, J. J. The NEOS Server. **IEEE Journal on Computational Science and Engineering**, p. 68-75, 1998

D'AMBROSIO, C.; LODI, A.; WIESE, S.; BRAGALLI, C. Mathematical programming techniques in water network optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 243, n. 3, p. 774-788, 2015.

DANTZIG, G. B. On the significance of solving linear programming problems with some integer variables. **Econometrica, Journal of the Econometric Society**, p. 30-44, 1960. ISSN 0012-9682.

Dolan, E.. **The NEOS Server 4.0 Administrative Guide**. Technical Memorandum ANL/MCS-TM-250, Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory. 2001

ELETRÓBRÁS. **Avaliação dos resultados do PROCEL 2005**. [s. L.]: Gráfica da Eletrobrás, 2005.

ELKINGTON, J. Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. **California Management Review**, v. 36, n. 2, p.90-100, 1994.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; PACHECO, G. C. Um estudo sobre segurança em estádios de futebol baseado na análise bibliométrica da literatura internacional. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 17, n. 2, p. 71-91, 2012. ISSN 1981-5344.

ENSSLIN, L.; GIFFHORN, E.; ENSSLIN, S. R.; PETRI, S. M.; VIANNA, W. B. Avaliação do desempenho de empresas terceirizadas com o uso da metodologia multicritério de apoio à decisão-constructivista. **Pesquisa Operacional**, v. 30, n. 1, p. 125-152, 2010. ISSN 0101-7438.

EUSUFF, M. M.; LANSEY, K. E. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 3, p. 210-225, 2003. ISSN 07339496 (ISSN).

GEEM, Z. W. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. **Engineering Optimization**, v. 38, n. 3, p. 259-280, 2006. ISSN 0305215X (ISSN).

GEIBLER, B.; MARTIN, A.; MORSI, A.; SCHEWE, L. Using piecewise linear functions for solving MINLPs. In: (Ed.). **Mixed Integer Nonlinear Programming**: Springer, 2012. p.287-314.

GEIBLER, B.; MORSI, A.; SCHEWE, L. A new algorithm for MINLP applied to gas transport energy cost minimization. In: (Ed.). **Facets of Combinatorial Optimization**: Springer, 2013. p.321-353.

GHADDAR, B.; NAOUM-SAWAYA, J.; KISHIMOTO, A.; TAHERI, N.; ECK, B. A. Lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. **European Journal of Operational Research**, v. 241, n. 2, p. 490-501, 2015. ISSN 03772217 (ISSN).

GIACOMELLO, C.; KAPELAN, Z.; NICOLINI, M. Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 2, p. 175-183, 2013. ISSN 07339496 (ISSN).

GROPP, W.; MORÉ, J. J. **Optimization Environments and the NEOS Server**. Approximation Theory and Optimization, M. D. Buhmann and A. Iserles, eds., Cambridge University Press, p. 167-182, 1997.

GÜNLÜK, O.; POCHET, Y. Mixing mixed-integer inequalities. **Mathematical Programming**, v. 90, n. 3, p. 429-457, 2001. ISSN 0025-5610.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2006.

JUNG, D.; KANG, D.; KANG, M.; KIM, B. Real-time pump scheduling for water transmission systems: Case study. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2014. ISSN 12267988 (ISSN).

KUREK, W.; OSTFELD, A. Multiobjective water distribution systems control of pumping cost, water quality, and storage-reliability

constraints. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 2, p. 184-193, 2014. ISSN 07339496 (ISSN).

LIBERTI, L. Symmetry in mathematical programming. In: (Ed.). **Mixed Integer Nonlinear Programming**: Springer, 2012. p.263-283.

LOPEZ-IBANEZ, M.; PRASAD, T. D.; PAECHTER, B. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 4, p. 337-346, 2008. ISSN 0733-9496.

MARCHAND, H.; MARTIN, A.; WEISMANTEL, R.; WOLSEY, L. Cutting planes in integer and mixed integer programming. **Discrete Applied Mathematics**, v. 123, n. 1, p. 397-446, 2002. ISSN 0166-218X.

MARKOWITZ, H. M.; MANNE, A. S. On the solution of discrete programming problems. **Econometrica: journal of the Econometric Society**, p. 84-110, 1957. ISSN 0012-9682.

MARTÍNEZ, F.; HERNÁNDEZ, V.; ALONSO, J. M.; RAO, Z.; ALVISI, S. Optimizing the operation of the Valencia water-distribution network. **Journal of Hydroinformatics**, v. 9, n. 1, p. 65-78, 2007. ISSN 14647141 (ISSN).

POLISETTY, P. K.; GATZKE, E. P. Piecewise linear relaxation techniques for solution of nonconvex nonlinear programming problems. **Journal of Global Optimization**, 2005.

PRICE, E.; OSTFELD, A. Iterative LP water system optimal operation including headloss, leakage, total head and source cost. **Journal of Hydroinformatics**, v. 15, n. 4, p. 1203-1223, 2013. ISSN 14647141.

RAMOS, H. M.; VIEIRA, F.; COVAS, D. I. C. Energy efficiency in a water supply system: Energy consumption and CO2 emission. **Water Science and Engineering**, v. 3, n. 3, p. 331-340, 2010. ISSN 16742370 (ISSN).

SAKARYA, A. B. A.; MAYS, L. W. Optimal operation of water distribution pumps considering water quality. **Journal of Water**

Resources Planning and Management, Reston, VA, United States, v. 126, n. 4, p. 210-220, 2000. ISSN 07339496 (ISSN).

SALOMONS, E.; GORYASHKO, A.; SHAMIR, U., RAO, Z.; ALVISI, S. Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network. **Journal of Hydroinformatics**, v. 9, n. 1, p. 51-64, 2007. ISSN 14647141 (ISSN).

SARTORI, S., ENSSLIN, L., CAMPOS, L. M. S.; ENSSLIN, S. R. Mapeamento do estado da arte do tema sustentabilidade ambiental direcionado para a tecnologia de informação. **TransInformação**, v. 26, n. 1, p. 77-89, 2014.

SELEK, I.; BENE, J. G.; HOS, C. Optimal (short-term) pump schedule detection for water distribution systems by neutral evolutionary search. **Applied Soft Computing**, v. 12, n. 8, p. 2336-2351, Aug 2012. ISSN 1568-4946.

SHERALI, H. D.; SUBRAMANIAN, S.; LOGANATHAN, G. V. Effective Relaxations and Partitioning Schemes for Solving Water Distribution Network Design Problems to Global Optimality. **Journal of Global Optimization**, v. 19, n. 1, p. 1-26, 2001. ISSN 09255001 (ISSN).

TANG, Y.; ZHENG, G.; ZHANG, S. Optimal control approaches of pumping stations to achieve energy efficiency and load shifting. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 55, p. 572-580, 2014. ISSN 0142-0615.

TOLEDO, F.; SANTOS, M. O. D.; ARENALES, M. N.; SELEGHIM JÚNIOR, P. Logística de distribuição de água em redes urbanas - Racionalização energética. **Pesquisa Operacional**, v. 28, n. 1, p. 75-91, 2008. ISSN 01017438 (ISSN).

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

VAN ZYL, J. E.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic

algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 2, p. 160-170, 2004. ISSN 0733-9496.

VIEIRA, F.; RAMOS, H. M. Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: A case study. **Energy Policy**, v. 36, n. 11, p. 4142-4148, Nov 2008. ISSN 0301-4215.

_____. Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water supply systems. **Renewable Energy**, v. 34, n. 3, p. 928-936, 2009. ISSN 09601481 (ISSN).

WORLD BANK (Comp.). **Technical Report: A primer on energy efficiency for municipal water and wastewater utilities**. Washington, 2012.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World**. Paris, UNESCO, 2015.

XU, Q. et al. Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks. **Ecological Informatics**, 2015. ISSN 15749541 (ISSN).

APÊNDICE A – Bibliometria

Este Apêndice tem por objetivo mostrar as etapas do mapeamento das publicações sobre o tema “otimização da operação de sistemas de distribuição de água”.

Para a consecução deste objetivo foram executadas especificadamente duas etapas, a saber: a) seleção de um conjunto de artigos mais reconhecidos cientificamente, denominado por portfólio bibliográfico, alinhados à visão dos autores sobre a temática “Otimização da operação de Sistemas de Distribuição de Água”; b) elucidação dos autores mais destacados, periódicos e palavras-chave sobre este tema.

Seleção do portfólio bibliográficos

Para seleção do portfólio bibliográfico, foram executadas as etapas de: a) seleção do banco de artigos brutos; e b) filtragem do banco de artigos brutos. O processo de seleção será detalhado nos itens a seguir.

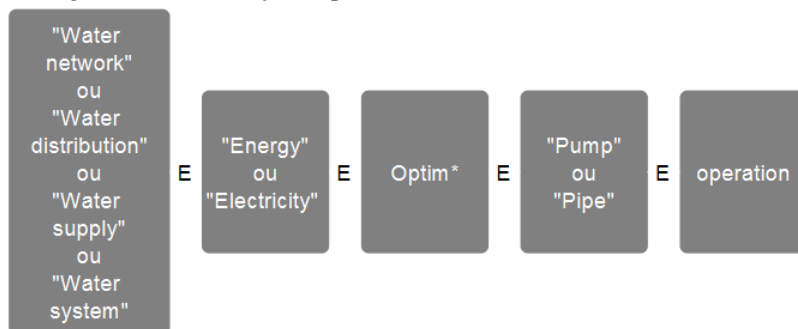
Seleção do banco de artigos brutos

Para pesquisa dos artigos brutos foram consultadas as bases de dados: Scopus, *Web of knowledge* e Ebsco. Utilizou-se ainda, inicialmente, outras bases de dados, mas em virtude destas apresentarem somente os mesmos artigos das bases citadas, optou-se por desconsiderá-las. A busca abrangeu os campos título (*article title*), o resumo (*abstract*) e as palavras-chave (*keywords*). A delimitação temporal foi de 15 anos (no limite compreendido entre o ano 2000 e maio de 2015) e publicações do tipo *Journal Article* e *Reviews*.

Para escolha das palavras utilizadas na busca analisaram-se alguns artigos alinhados com o tema, partindo do pressuposto que a busca deveria retornar tais artigos como resultado. Além disso, durante as primeiras buscas, observaram-se expressões equivalentes que foram sendo adicionadas às combinações de palavras inicialmente escolhidas.

Após exaustivas buscas, a escolha resultou na combinação de palavras elucidadas na Figura 27.

Figura 27 - Combinação de palavras utilizadas na busca



Fonte: Elaboração do autor (2015)

Ao concluir a busca, obteve-se como resultado um banco com 237 artigos.

Filtragem do banco de artigos brutos

Para filtragem dos artigos utilizou-se como ferramenta o software *EndNote*, que possibilitou a importação dos artigos selecionados. O primeiro filtro aplicado – exclusão dos títulos repetidos, existentes em virtude dos elementos comuns às três bases de dados consultadas – resultou em 151 artigos.

O segundo filtro selecionado – leituras dos títulos, excluindo-se aqueles não alinhados ao tema de pesquisa – identificou 50 artigos, os quais foram submetidos à análise quanto ao reconhecimento científico, associado ao número de citações encontradas a partir do Google Scholar.

Nesta etapa, os artigos foram divididos em dois grupos: i) os artigos com reconhecimento confirmado; e ii) os artigos com reconhecimento ainda não confirmado. Para cada grupo foram utilizados critérios diferentes para filtragem.

Como critério para composição dos artigos com reconhecimento confirmado (i), utilizou-se aqueles cuja soma representasse 80% de todas as citações dos 50 artigos. Nesta etapa, 12 artigos foram selecionados e submetidos à leitura do resumo, o que validou o alinhamento com tema de 11 deles, os quais passaram para a etapa de leitura integral.

Para o segundo grupo (ii) – artigos com reconhecimento ainda não confirmado –, utilizaram-se os seguintes critérios: a) artigos

publicados há mais de dois anos: para aqueles com mais de dois anos (anteriores a 2013), foram selecionados somente os artigos cujos autores eram os mesmos dos artigos com reconhecimento já confirmado e tivessem seus resumos alinhados com o tema de pesquisa. Deste modo, dos 21 artigos anteriores a 2013, foram selecionados seis artigos que passaram para a etapa de leitura integral; b) artigos publicados nos últimos dois anos: para aqueles publicados há menos de dois anos foram selecionados somente os que tiveram seus resumos alinhados com o tema. Assim, dos 17 artigos ainda sem reconhecimento científico, oito artigos passaram para a etapa de leitura integral.

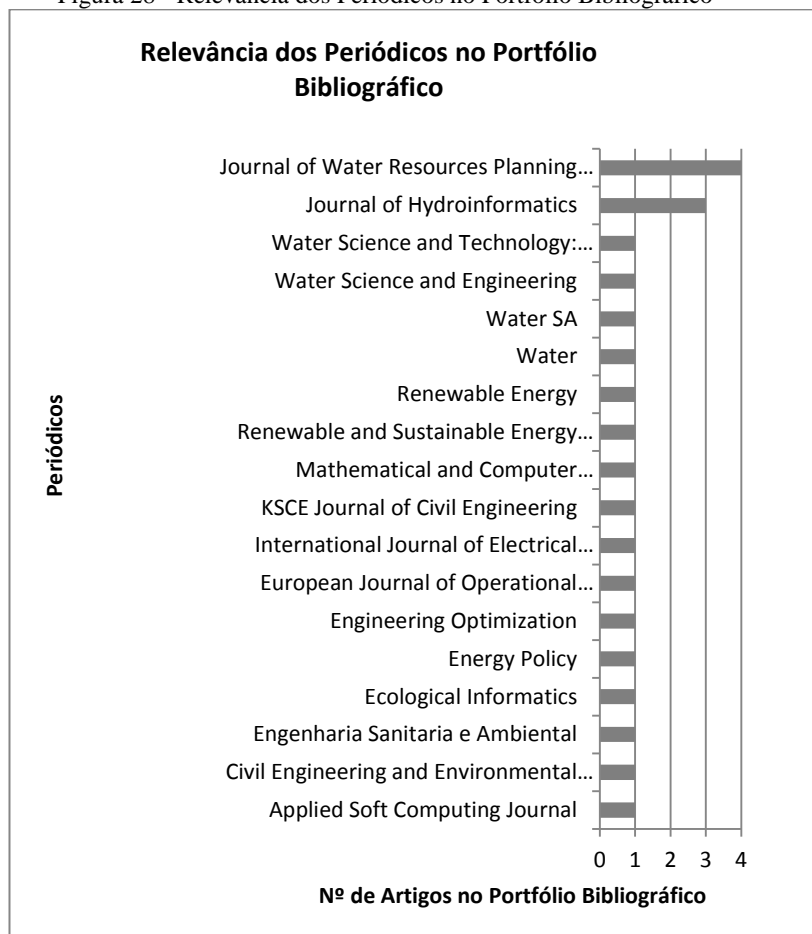
Deste modo, no total 25 artigos foram lidos na íntegra e dois foram excluídos por desalinhamento com o tema, resultando num portfólio de 23 artigos (Apêndice B), dos quais um é de revisão. O portfólio de artigos será analisado nas próximas sessões deste trabalho.

Análise bibliométrica

Após a definição dos artigos que compõem o portfólio bibliográfico, partiu-se para a análise bibliométrica, que neste caso compreendeu: a) a estimativa do grau de relevância dos periódicos; b) a estimativa do reconhecimento científico dos artigos; c) a estimativa do grau de relevância dos autores; e d) a estimativa das palavras-chave mais utilizadas.

Na primeira análise desenvolvida, buscou-se elencar os periódicos que mais publicam estudos sobre o tema. Os destaques foram os periódicos “Journal of Water Resources Planning and Management” e o “Journal of Hydroinformatics” com quatro e três artigos do portfólio, respectivamente (Figura 28).

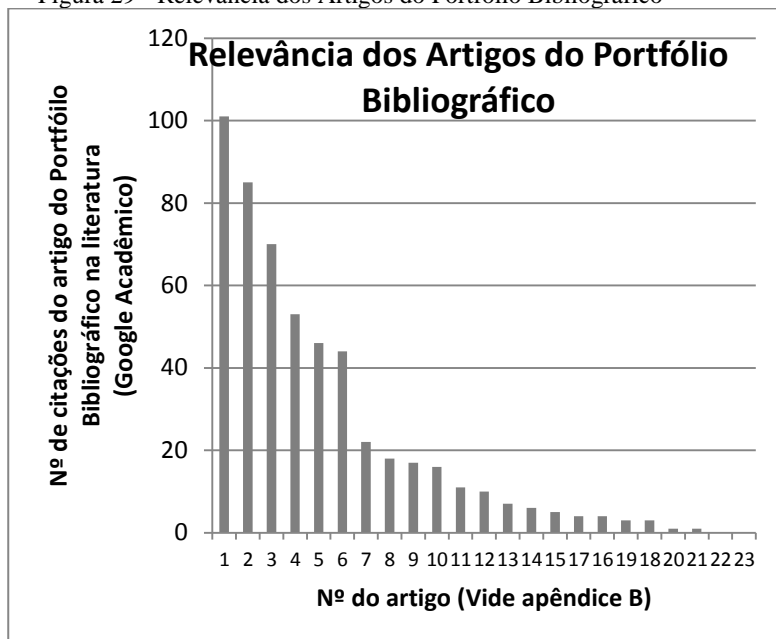
Figura 28 - Relevância dos Periódicos no Portfólio Bibliográfico



Fonte: Elaboração do autor

A segunda análise, por sua vez, buscou identificar os artigos mais citados no portfólio (Figura 29). O resultado dessa análise evidencia o artigo “*Optimal operation of water distribution pumps considering water quality*” como o de maior referência, com 101 citações.

Figura 29 - Relevância dos Artigos do Portfólio Bibliográfico

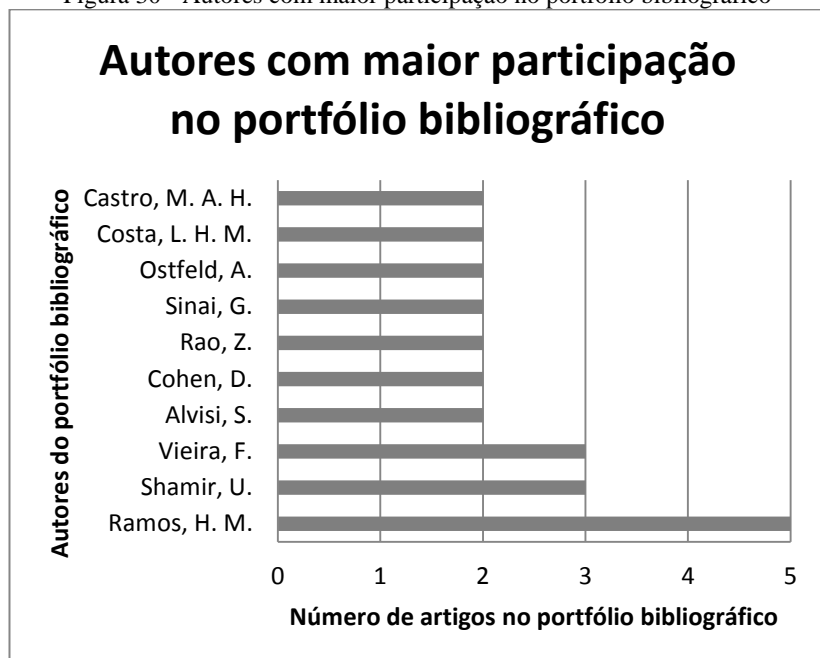


Fonte: Elaboração do autor (2015)

É válido ressaltar que os artigos do portfólio variam quanto à data de publicação, o que não permite uma comparação fidedigna entre artigos quanto ao número de citações de cada um.

A terceira análise realizada elucidou os autores com maior número de publicações dentre os artigos do portfólio (Figura 30). Ramos, H. M., Shamir, U., Vieira, F., Alvisi, S., Cohen, D., Rao, Z., Sinai, G., Ostfeld, A., Costa, L. H. M., Castro, M. A. H. são os autores com mais de uma publicação. Os autores não mencionados na Figura 30 encontram-se no Apêndice B.

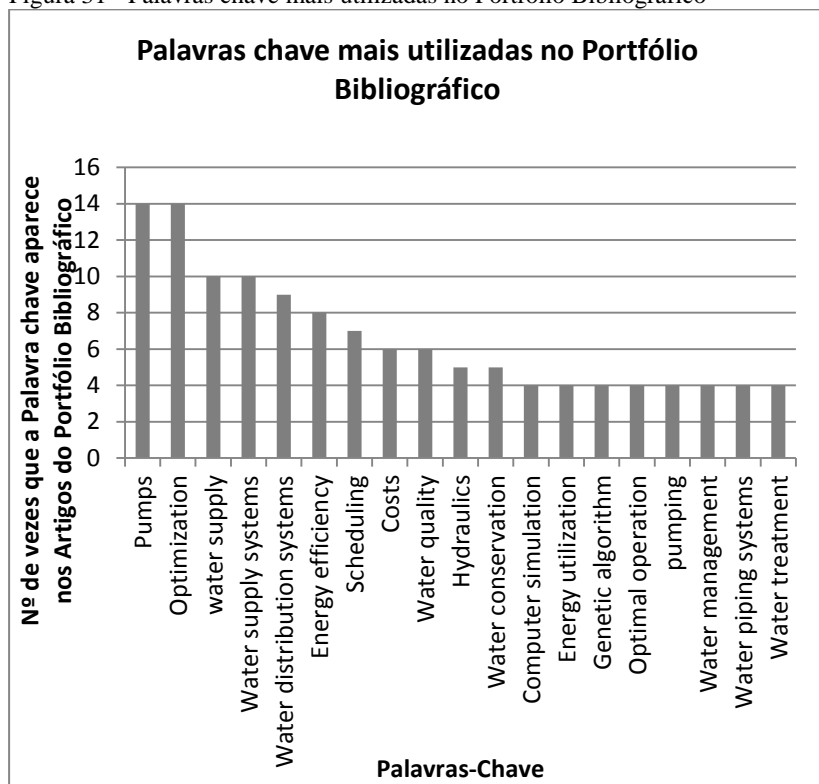
Figura 30 - Autores com maior participação no portfólio bibliográfico



Fonte: Elaboração do autor (2015)

Na quarta análise, foi possível verificar as palavras-chave mais utilizadas pelos artigos do portfólio (Figura 31).

Figura 31 - Palavras chave mais utilizadas no Portfólio Bibliográfico



Fonte: Elaboração do autor (2015)

Dessa forma, observa-se que existe consistência entre as palavras-chave empregadas na busca e as mais frequentes nos artigos (Figura 27).

APÊNDICE B – Portfólio Bibliográfico

Nº do artigo	Título do artigo	Autores	Revista	Ano
1	Optimal operation of water distribution pumps considering water quality.	Sakarya, A. B. A., Mays, L. W.	Journal of Water Resources Planning and Management	2000
2	Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks.	López-Ibáñez, M., Prasad, T. D., Paechter, B.	Journal of Water Resources Planning and Management	2008
3	Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water supply systems.	Vieira, F., Ramos, H. M.	Renewable Energy	2009
4	Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: A case study.	Vieira, F., Ramos, H. M.	Energy Policy	2008
5	Optimizing the operation of the Valencia water-distribution network.	Martínez, F., Hernández, V., Alonso, J. M., Rao, Z., Alvisi, S.	Journal of Hydroinformatics	2007
6	Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network.	Salomons, E., Goryashko, A., Shamir, U., Rao, Z., Alvisi, S.	Journal of Hydroinformatics	2007
7	Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling.	Giacomello, C., Kapelan, Z., Nicolini, M.	Journal of Water Resources Planning and Management	2013
8	Optimal operation of multiquality water supply systems-III: the Q-C-H model.	Cohen, D., Shamir, U., Sinai, G.	Engineering Optimization	2000
9	Optimal (short-term) pump schedule detection for water distribution systems by neutral evolutionary search.	Selek, I., Bene, J. G., Hos, C.	Applied Soft Computing Journal	2012
10	An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling.	Bagirov, A. M., Barton, A. F., Mala-Jetmarova, H., Al Nuaimat, A., Ahmed, S. T., Sultanova, N., Yearwood, J.	Mathematical and Computer Modelling	2013
11	Efficiency achievement in water supply systems - A review.	Coelho, B., Campos, A. A.	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2014

- 12 Multiobjective water distribution systems control of pumping cost, water quality, and storage-reliability constraints. Kurek, W., Ostfeld A. Journal of Water Resources Planning and Management 2014
- 13 A Lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. Ghaddar, B., Naoum-Sawaya, J., Kishimoto, A., Taheri, N., Eck, B. European Journal of Operational Research 2015
- 14 Hybrid genetic algorithm in the optimization of energy costs in water supply networks. Costa, L. H. M., Ramos, H. M., Castro, M. A. H., Water Science and Technology: Water Supply 2010
- 15 Optimisation of complex water supply systems with water quality, hydraulic and treatment plant aspects. Cohen, D., Shamir, U., Sinai, G. Civil Engineering and Environmental Systems 2009
- 16 Energy efficiency in a water supply system: Energy consumption and CO2 emission. Ramos, H. M., Vieira, F., Covas, D. I. C. Water Science and Engineering 2010
- 17 Operating pumps to maximise efficiency. Bunn, S. Water 2009
- 18 Optimal control approaches of pumping stations to achieve energy efficiency and load shifting. Tang, Y., Zheng, G., & Zhang, S. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2014
- 19 Iterative LP water system optimal operation including headloss, leakage, total head and source cost. Price, E., Ostfeld A. Journal of Hydroinformatics 2013
- 20 Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks. Xu, Q., Chen, Q., Qi, S., Cai, D. Ecological Informatics 2015
- 21 Use of hybrid genetic algorithms for optimized operation of water supply systems. Costa, L. H. M., Castro, M. A. H., Ramos, H. M. Engenharia Sanitária e Ambiental 2010
- 22 Real-time pump scheduling for water transmission systems: Case study. Jung, D., Kang, D., Kang, M., Kim, B. KSCE Journal of Civil Engineering. 2014
- 23 Optimum reliable operation of water distribution networks by minimising energy cost and chlorine dosage. Babaei, N., Tabesh, M., Nazif, S. Water AS 2015